

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”

Теплоенергетичний факультет

Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів

«На правах рукопису»

«До захисту допущено»

УДК 65.011.56

В.о.завідувача кафедри

_____ / В.А.Волощук/

“ _____ ” _____ 2019 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності **151“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”**

на тему: Автоматична система керування нагрівальним колодязем

Виконав: студент II курсу, групи ТО-81мп

Березанський Єгор Андрійович

(прізвище ім’я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник доц., к.т.н. Бунке Олександр Сергійович

_____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент директор ТОВ «Профселлінг» Осовський О.В.

_____ (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2019 року

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут

імені Ігоря Сікорського”

Факультет

Теплоенергетичний

Кафедра

Автоматизації теплоенергетичних процесів

Рівень вищої освіти – другий(магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність

151“Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

/В.А.ВОЛОЩУК/

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ “

2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Березанський Єгор Андрійович

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації

Автоматична система керування

нагрівальним колодязем

науковий керівник дисертації

доцент, к.т.н. Бунке Олександр Сергійович

(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «4» листопада 2019 р. № 3812-с

2. Термін подання студентом дисертації

«10» грудня 2019 р.

3. Об'єкт дослідження нагрівальний колодязь

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою)

Сучасні інформаційні технології, які можливо використати в роботі з автоматичними системами керування

5. Перелік завдань, які потрібно розробити :

Розробка автоматичної системи керування нагрівальним колодязем, розробка SCADA системи, розробка додатку на платформі Android для контролю роботи системи та впливу на неї.

6. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу
функціональна схема АСК нагрівального колодязя, комп'ютерна презентація

7. Орієнтований перелік публікацій

1. Березанський Є.А., Бунке О.С. Реалізація SCADA – систем з використанням Android // Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів 23-26 квітня 2019 р. С.15

2. Березанський Є.А., Бунке О.С. Автоматизована система керування нагрівальним колодязем // Матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції аспірантів, магістрантів і студентів. – 2018. С.43

8. Дата видачі завдання

" 04 " вересня 2018 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	<i>Видача завдання</i>	04.09.2019	
2	<i>Розділ 1,2. Аналітичний огляд проблеми, характеристика технологічного об'єкту управління</i>	28.10.2019	
3	<i>Розділ 3. Дослідження об'єкту управління</i>	03.11.2019	
4	<i>Аркуш 1. Функціональна схема автоматизації</i>	07.11.2019	
5	<i>Розділ 3. Формулювання вимог та розробка ПТКЗА</i>	16.11.2019	
6	<i>Розділ 3. Розрахункова частина</i>	19.11.2019	
7	<i>Розділ 4. Розробка системи управління об'єктом</i>	24.11.2019	
9	<i>Розділ 5. Старт-проект</i>	01.12.2019	

10	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	04.12.2019	
12	<i>Попередній захист магістерської дисертації</i>	10.12.2019	
13	<i>Захист</i>	18.12.2019	

Студент

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 107 сторінок.

Пояснювальна записка містить 75 малюнків, 26 таблиць, 1 креслення.

Об'єкт дослідження – Нагрівальний колодязь.

Мета роботи – розробка автоматичної системи керування нагрівальним колодязем та розробка додатку на платформі Android для спостереження роботи системи та впливу на неї.

В першому розділі приділяється увага аналітичному огляді проблеми, та сучасному стану галузі.

У другому розділі розглядається характеристика технологічного об'єкту управління, технічним характеристикам та огляду систем управління.

У третьому розділі досліджується об'єкт управління, опис функцій системи автоматизації, формування вимог та розробка структури ПТКЗА, побудова моделей та розрахунок регуляторів.

У четвертому розділі описується розробка системи управління об'єктом, опис програмно-технічних рішень супервізорного рівня ПТКЗА, локальний та супервізорний рівень

П'ятий розділ присвячений стартап проекту, розробці додатку на платформі Android для контролю параметрами системи та передачі керуючих сигналів в неї.

ABSTRACT

The explanatory note has 107 pages.

The explanatory note contains 75 drawings, 26 tables, 1 drawings.

Object of study - Heating well.

The purpose of the work is to develop an automatic well control system and to develop an application on the Android platform to monitor and influence the system.

The first section focuses on the analytical overview of the problem and the current state of the industry.

The second section describes the characteristics of the technological control object, the technical characteristics and the overview of the control systems.

The third section explores the object of control, the description of the functions of the automation system, the formation of requirements and the development of the structure of STCAT, the construction of models and the calculation of regulators.

The fourth section describes the development of an object management system, a description of the software and control solutions of the STCAT supervisor level, local and supervisory level

The fifth section is devoted to the startup project, the development of an application on the Android platform to control the parameters of the system and to transmit control signals to it.

Зміст

ВСТУП	10
1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ	11
1.1 Сучасний стан галузі.....	11
1.2 Загальна постановка задачі	11
2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ.....	12
2.1 Нагрівальний колодязь.....	12
2.2 Технічні характеристики об'єкту управління	16
2.3 Огляд систем управління.....	17
2.3.1 Регулювання температури шляхом витрати газу та повітря	17
2.3.3 Регулювання розрідження.....	18
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ.....	20
3.1 Опис функцій системи автоматизації	20
3.2 Формлювання вимог до ПТКЗА	23
3.3 Опис інформаційного забезпечення ПТКЗА.....	29
3.4 Розробка структури ПТКЗА.....	32
3.5 Розрахунок надійності функціонування	37
3.6 Побудова моделі САК для контуру регулювання температури в топці колодязя.....	42
3.6.1 Розрахунок параметрів регулятора методом РАФХ.....	43
3.6.2 Розрахунок параметрів регулятора методом МАЧХ.....	50
3.6.3 Розрахунок параметрів регулятора інженерним методом	58
3.6.4 Порівняння методів.....	60
3.6.5 Дослідження системи автоматичного керування на грубість	62
3.7 Побудова моделі САК для контуру регулювання тиску в топці колодязя.....	73

3.7.1 Розрахунок параметрів регулятора методом РАФХ.....	74
3.7.2 Розрахунок параметрів регулятора методом МАЧХ.....	80
3.7.3 Розрахунок параметрів регулятора інженерним методом	89
3.7.4 Порівняння методів.....	91
3.7.5 Дослідження системи автоматичного керування на грубість	93
4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ	98
4.1. Опис програмно-технічних рішень локального рівня ПТКЗА.....	98
4.1.1. Порядок програмування контролера та обмін даними з верхнім рівнем автоматизації	98
4.1.2. Реалізація функцій нижнього рівня системи автоматизації	98
4.2. Опис програмно-технічних рішень супервізорного рівня ПТКЗА ...	100
4.3 Опис Локального рівня.....	101
4.3 Опис супервізорного рівня.....	106
4.4 Порядок перевірки системи автоматизації.....	111
5. СТАРТАП	114
5.1 Загальна характеристика ідеї стартап-проекту	115
5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	116
5.3 SWOT-аналіз розроблюваного проекту	117
5.4 Канали збуту	118
5.5 Визначення витрат та ресурсів необхідних для проекту	119
ВИСНОВОК.....	121

ВСТУП

Переваги децентралізованої автоматизації для керування певними класами об'єктів відомі давно, але на сьогоднішній день досі широко розповсюджене централізоване управління через пульти операторів. Беручи до уваги, що кілька років тому тенденція управління та контролю технологічним процесом була віддана диспетчерам-операторам, то в даний час ця тенденція спрямована до розподілених рішеннями, тобто до децентралізованих. Важливі технологічні моменти виробничого процесу негайно обробляються оператором на місці тим самим, забезпечуючи децентралізоване управління. Тільки важлива інформація передається на центральний процесор.

В даний час широкого поширення набули програмовані логічні контролери (ПЛК), які в якості контролерів польового рівня є основним ядром автоматизованих систем управління технологічних процесів і виробництв.

Перша і головна перевага ПЛК, що зумовила їх широке поширення, полягає в тому, що один компактний електронний пристрій може замінити десятки і сотні електромеханічних реле. Друга перевага в тому, що функції логічних контролерів реалізуються не апаратно, а програмно, що дозволяє постійно адаптувати їх до роботи в нових умовах з мінімальними зусиллями і витратами. Метою автоматизації управління печі камерного типу служить зниження трудомісткості обслуговування, а також підвищення безпеки і зниження травматизму. Безпека підвищується шляхом введення необхідного захисту, сигналізаторів і блокувань. Також, система автоматизації повинна сприяти зниженню енергоємності і матеріалоємності, скороченню простоїв через вихід з ладу електрообладнання. При розробці системи автоматизації слід приділити увагу можливому спрощенню структури і надійності отримання інформації системою про параметри процесу

1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ

1.1 Сучасний стан галузі

Сучасний стан задачі математичної оптимізації теплової роботи нагрівальних колодязів має складнощі у системі «нагрівальні гази - кладка печі - метал», які пов'язані з забезпеченням рівномірного підведення теплової енергії до поверхні металу, що нагрівають. Вирішенням такої проблеми може бути удосконалення теплових схем опалювання печей зазначеного типу, а також методів спалювання газоподібного палива, та зокрема, як одного з його варіантів – спалювання палива за стадійним режимом.

1.2 Загальна постановка задачі

Для ефективного керування роботою печі камерного типу, в рамках проекту потрібно створити систему автоматичного керування технологічними параметрами застосовуючи сучасні технології.

При розробленні автоматичної системи керування піччю камерного типу необхідно забезпечити зручну взаємодію користувача з представленим функціоналом і можливість передачі отриманих результатів до SCADA-системи.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ

2.1 Нагрівальний колодязь

Нагрівальний колодязь - це основний тип нагрівального пристрою, що встановлюється для нагріву злитків перед обтискними станами (блюмінгів і слябінгів), на яких прокочують злитки вагою не менше 2-3 т і товщиною 350 - 400 мм і більше, для того щоб нагрів проходив рівномірно його ведуть з 4 сторін, встановлюючи злитки вертикально. Колодязі об'єднують в групи (по 2 або 4 колодязя) і для кожної групи передбачається окрема димова труба.

Нагрівальний колодязь є піччю камерного типу. У ньому підтримується однакова температура по всьому об'єму.

Переваги нагріву великих злитків в нагрівальному колодязі:

- 1) так як злитки розташовуються вертикально, усувається небезпека зсуву усадочної раковини при вступі до колодязя злитків з не застиглою серцевиною;
- 2) завдяки вертикальному розташуванню злитків велика частина їх поверхні омивається продуктами згоряння палива і отримує тепло шляхом випромінювання від кладки, що забезпечує більш рівномірне і швидке нагрівання металу, ніж в печах інших типів;
- 3) завантажувати і вивантажувати великовагові злитки в вертикальному положенні порівняно просто (спеціальними колодязними кранами).

Тепло, що міститься в тільки що затверділому злитку сталі з температурою поверхні не менше 1000 °С, досить для того, щоб вся маса металу злитка була доведена до температури прокатки. Саме тому такий злиток досить витримати якийсь час в неопалюваній, але добре теплоізолюваній камері для вирівнювання температури по перетину злитка.

Після цього злиток без додаткового підігріву можна видавати на стан для прокатки.

Паливом для нагріву металу в нагрівальних колодязях є змішаний газ. Використовується суміш з природним газом і попередньо підігрітий чистий доменний газ.

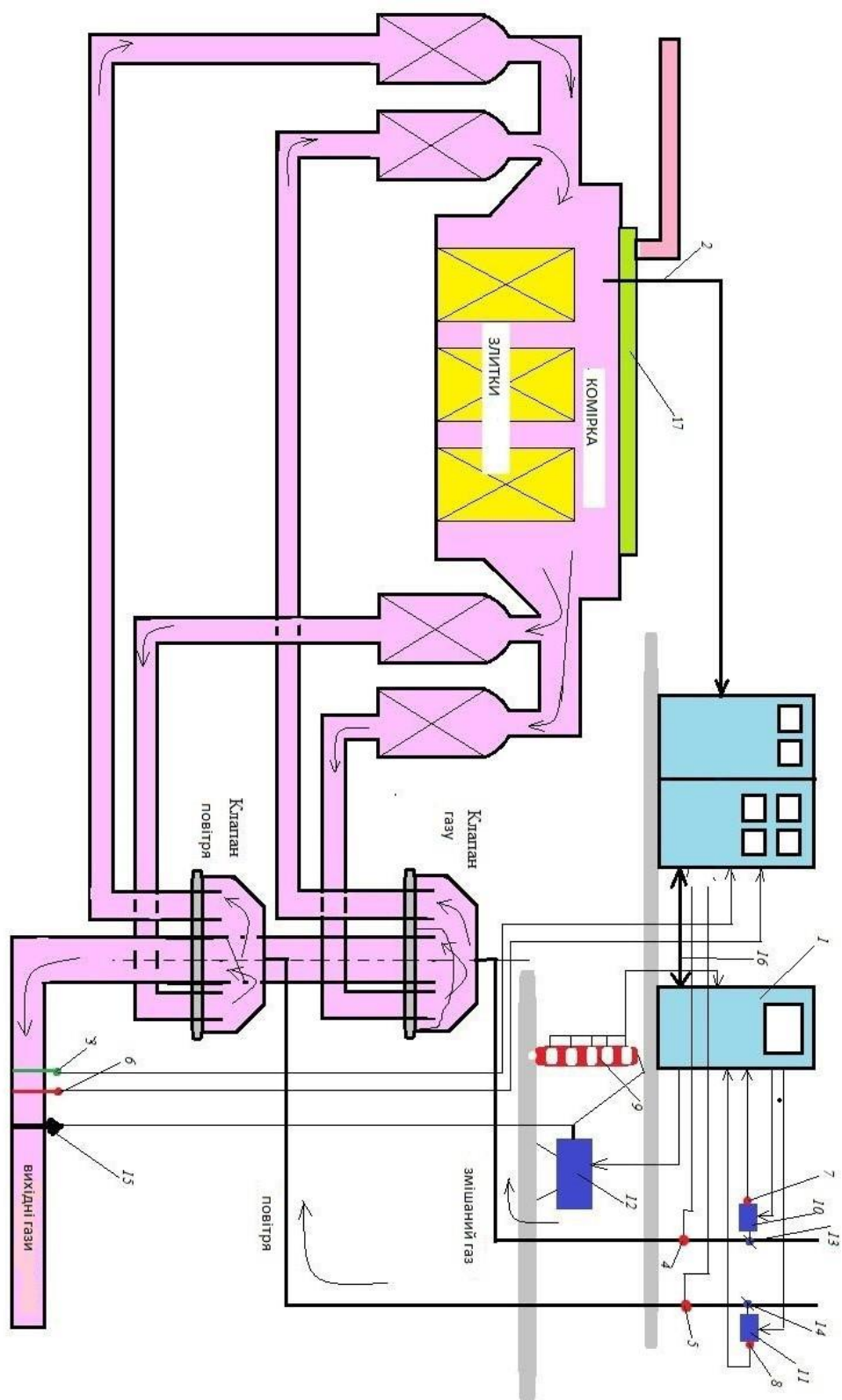


Рис. 2.1 Технологічна схема нагрівального колодязя

Умовні позначення на Рис. 2.1:

1. Шафа керування нагрівальним колодязем;
2. Термопара вимірювання температури в комірці;
3. Термопара вимірювання температури вихідних газів;
4. Датчик витрати газу;
5. Датчик витрати повітря;
6. Датчик розрідження перед шибером;
7. Датчик положення регулюючої заслонки газу;
8. Датчик положення регулюючої заслонки повітря;
9. Датчик положення шибера;
10. Виконуючий механізм регулюючої заслонки газу;
11. Виконуючий механізм регулюючої заслонки повітря;
12. Виконуючий механізм шибера;
13. Регулююча заслонка газу;
14. Регулююча заслонка повітря;
15. Шибер;
16. Сигнальні кабелі;
17. Кришка.

Принцип роботи нагрівального колодязя

Зверху відкривається кришка і в комірку завантажуються злитки (від 4 до 24). Ці злитки нагріваються до необхідної температури, а після нагрівання витягуються поштучно і направляються для прокатки на обтискні стани. Далі цикл завантаження і нагріву злитків повторюється.

Нагрівання злитків складається з двох періодів. У першому періоді витрата палива (теплова потужність печі) підтримується на максимальному рівні.

До кінця цього періоду температура печі досягає такого рівня, який в подальшому гарантує якісний нагрів металу. Якість нагріву забезпечується витримкою в 2-му періоді за умови сталості температури печі ($t_{\text{печ}} = \text{const}$). Температура поверхні металу, а також перепаду температури по перетину злитка в цьому періоді досягає заданого значення.

Перший період називають періодом нагріву ($M = \text{const}$), а другий період - періодом витримки ($t_{\text{печ}} = \text{const}$).

В нагрівальні колодязі зазвичай надходять злитки з яких 95% мають температуру поверхні. При такій температурі поверхні злиток може мати рідку серцевину.

Зазвичай на металургійних заводах нагрівальні колодязі є свого роду буфером для спалювання низькокалорійного газоподібного палива (доменний газ, коксодомена суміш). У цьому випадку висока температура в робочому просторі досягається шляхом підігріву повітря, а в ряді випадків (при спалюванні доменного газу) - шляхом підігріву і газу.

Для створення потрібного для цих колодязів тиску повітря перед пальником з метою забезпечення факела необхідної довжини повітря через керамічний рекуператор не нагнітається, а протікає екстаустером, він же подає до пальника.

Залежно від способу нагрівання повітря і газу розрізняють регенеративні (найдавніші колодязі) і рекуперативні нагрівальні колодязі.

2.2 Технічні характеристики об'єкту управління

Таблиця 2.1 Основні технологічні параметри

Назва	Одиниці вимірювання	Значення
Тиск шлакових газів	Па	30

Температура в топці	°С	1200
Витрата газу	м³/год	1600
Витрата повітря	м³/год	2200
Температура газу	°С	30
Температура повітря	°С	30
Тиск повітря	кПа	6
Тиск газу	кПа	7

2.3 Огляд систем управління

2.3.1 Регулювання температури шляхом витрати газу та повітря

Регулювання економічності по співвідношенню «паливо – повітря». При постійній якості палива його витрата і кількість повітря, необхідне для забезпечення необхідної повноти згоряння, пов'язані прямою пропорційною залежністю, яка встановлюється в результаті режимних випробувань. Якщо вимірювання витрати палива здійснюється досить точно, то підтримка оптимального надлишку повітря можна здійснити, використовуючи схему регулювання подачі повітря, відому під назвою «паливо – повітря» (рис. 2.2). При газоподібному паливі необхідне співвідношення між кількостями газу і повітря здійснюється найбільш просто.

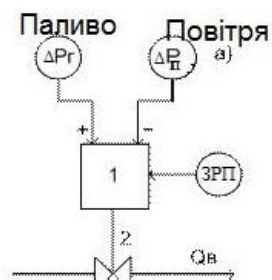


Рис. 2.2 Схема регулювання «паливо- повітря»

Контроль та регулювання витрати загального повітря необхідний для підтримки економічного режиму згоряння палива в колодязі. Використання методу регулювання за витратою газоподібної суміші і співвідношення її з повітрям є найбільш ефективним для регулювання економічності горіння теплових агрегатів. Тому в даній роботі була обрана для дослідження АСК регулювання витрати повітря по витраті палива (рис.2.2).

2.3.3 Регулювання розрідження.

Тиск в робочому просторі колодязя залежить від кількості палива та повітря, що подається в колодязь, кількості вихідних продуктів згоряння і положення шиберів, що змінюють опір димовідводного тракту. Кількість відведеного диму і тиск в печі регулюється за допомогою одного або декількох регулюючих шиберів. Викидання продуктів згоряння здійснюється за допомогою димососів. Оскільки більшість печей не є герметичними об'єктами, величина тиску в робочому просторі колодязя істотно впливає на його роботу. Якщо тиск в колодязі нижче тиску навколишнього простору, то здійснюється підсмоктування холодного повітря в колодязь, що призводить до зниження температури і додаткової витрати палива. При істотному позитивному перепаді тисків продукти згоряння будуть в значній кількості викидатися з колодязя в цех, що теж небажано.

При регулюванні параметрів тиску застосовують просту схему керування (рис 2.4). На регулятор надходить значення тиску з датчика тиску, його значення порівнюються з заданими. Регулятор змінює положення РО, а саме клапану на паропроводі залежно від різниці тиску, за допомоги

електроприводу. При зміні тиску, змінюється витрата економічності горіння, після чого встановлюється потрібне значення тиску.

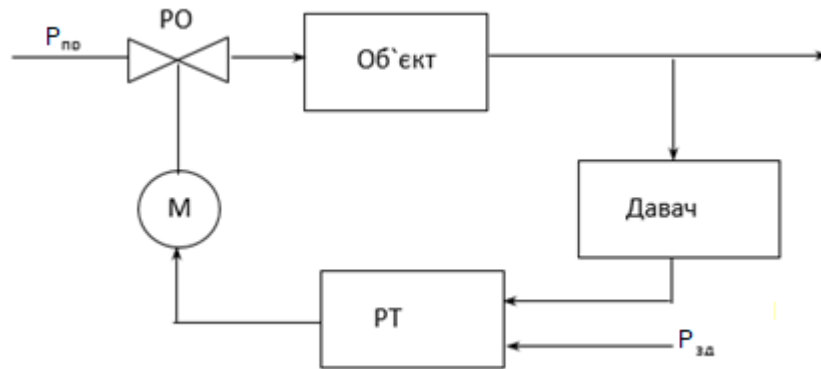


Рис. 2.4 Схема регулювання тиску в колодязі

Використання складніших систем регулювання тиску в нагрівальному колодязі не приведуть до суттєвих покращень показників якості.

Одноконтурна система регулювання задовольняє показники якості. Для даного проекту візьмемо одноконтурну системи регулювання тиску в нагрівальному колодязі.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОБ'ЄКТУ УПРАВЛІННЯ

3.1 Опис функцій системи автоматизації

АСУТП нагрівального колодязя забезпечує функції контролю, регулювання, сигналізації, захисту та блокування. Для забезпечення нормального режиму роботи об'єкту керування необхідно забезпечити виконання таких функцій:

1. Функції контролю.

Технологічні параметри, які підлягають контролю зведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Контроль технологічних параметрів

Параметр	Межі виміру
Витрата палива на вході	1600 м ³ /год
Витрата повітря на вході	2200 м ³ /год
Температура в топці колодязя	1200 °С
Тиск в топці	40 Па
Температура палива на вході	25 °С
Температура повітря на вході	25 °С
Температура вихідних газів	800 °С

2. Функції регулювання

У даному проекті забезпечуються наступні функції регулювання:

Регулювання розрідження в колодязя. Контролер отримує інформацію від датчика тиску і генерує керуючий вплив на РО. РО відкриває заслонку вихідних газів за рахунок чого і відбувається регулювання розрідження.

- Регулювання температури витратою газу та повітря здійснюється завдяки витратомірам, які визначають витрату та при досяганні аварійних значень подають сигнали на пускачі, які приводять в дію електроприводи для закриття або відкриття заслонок.

3. Сигналізація

У проекті передбачена сигналізація, яка реалізована у HMI/SCADA-системі та здійснюється візуалізація у сенсорній панелі, що розташована на дверях щита.

В межах проекту було прийнято рішення про реалізацію аварійної сигналізації, яка спрацьовує при досягненні технологічним параметром аварійного значення, а саме при зниженні та перевищенні допустимого значення температури в топці колодязя (максимальне значення 1300°C), витрати повітря (максимальне значення $2200 \text{ м}^3/\text{год}$, мінімальне $1300 \text{ м}^3/\text{год}$), витрати палива (максимальне значення $1600 \text{ м}^3/\text{год}$, мінімальне $1000 \text{ м}^3/\text{год}$) тиск під кришкою колодязя (максимальне значення 40 Па , мінімальне 5 Па). І також реалізація попереджувальних повідомлень, при відхиленні технологічних параметрів від нормальних значень.

4. Захист та блокування

Автоматичні захисти призначені для запобігання аварії обладнання у випадку відхилення параметрів за допустимі границі. По змісту свого призначення захисні пристрої повинні бути більш надійними, ніж обладнання, яке вони захищають. Блокування реалізоване в тому, що не допускає самостійного ввімкнення в роботу системи регулювання після того, як було ліквідовано недопустимі або аварійні відхилення параметрів або після

ліквідації наслідків зникнення струму в мережі живлення системи. При сигналізації параметрів рівня температури, тиску в топці колодязя, витрати газу або повітря відбувається блокування.

При аварійній ситуації, вихідні гази, які виходять з колодязя, будуть повністю виходити через трубу.

Також при перевищенні нижньої/верхньої межі рівня витрати палива або повітря відкриваються/закриваються клапани, які збільшуються або зменшують витрати ресурсів.

АСУТП є дворівневою. Нижній рівень АСУ являє собою контролер(збирач даних) з вимірювальною та виконавчою апаратурою, що здійснює неперервне регулювання і програмно-логічне управління, тобто на нижньому рівні виконуються функції контролю, регулювання, захисту та блокування.

Верхній рівень АСУТП – супервізорний. HMI/SCADA – система повинна реалізовувати наступні функції:

1. обмін даними з контролерами;
2. архівування даних;
3. візуалізація технологічного процесу у вигляді мнемосхем;
4. ведення історичних алармів і алармів реального часу;
5. побудова історичних трендів і трендів реального часу;
6. обчислення і видача завдання в контури регулювання.

Тобто на верхньому рівні реалізуються функції сигналізації, а також продубльовані функції регулювання, захисту та блокування.

3.2 Формулювання вимог до ПТКЗА

Вимоги, які висуваються до ПТКЗА:

1. Відповідність державним та міжнародним стандартам:

- Програмовані логічні контролери та супутнє обладнання повинні відповідати вимогам державного стандарту ДСТУ 4108-2002 «Контролери програмовані. Частина 2. Вимоги до обладнання та випробування», міжнародним аналогом якого є стандарт ІЕС 61131-2. Дані стандарти визначають вимоги щодо обслуговування, експлуатації, зберігання ПЛК та супутнього обладнання, а також вимоги щодо безпеки;

- Обладнання, що входить до складу вимірювальних каналів та каналів керування повинне відповідати вимогам стандарту ІЕС 60654-1-2001 «Обладнання для вимірювання та керування в промислових процесах. Умови експлуатації. Частина 1. Кліматичні умови» та ІЕС 60654-2-2001 «Обладнання для вимірювання та керування в промислових процесах. Умови експлуатації»;

- Технічні засоби в складі ПТКЗА повинні відповідати вимогам стандарту ДСТУ 3451-96 «Технічні засоби для розподілення автоматизованих систем керування технологічними процесами. Загальні вимоги до спряження виробів»;

- Мови програмування ПЛК повинні відповідати вимогам стандарту ІЕС 61131-3;

- ПТКЗА повинен відповідати вимогам стандарту ДСТУ 3481-96 «Локальна мережа введення - виведення для розподілених автоматизованих систем керування. Загальні технічні вимоги»;

- Використання інструментального ПЗ (LCADA- конфігуратора), що відповідає вимогам стандарту ІЕС-61131.

2. Вимоги щодо реалізації функцій автоматизації.

Реалізація функцій автоматизації здійснюється за допомогою приладів вимірювання технологічних параметрів, контролерної техніки, що отримує сигнали від вимірювальних приладів і на основі отриманої інформації формує керуючу дію, яка виконується за допомогою виконавчих механізмів. Тому якість виконання функцій системи автоматизації буде залежати від якості інформації, що надходить від вимірювальних приладів, можливості реалізації законів керування та якості виконавчої апаратури. Для цього в основі нижнього рівня необхідно обрати надійний та якісний вільно програмований контролер, за допомогою якого можна реалізувати необхідні закони керування. Контролер повинен мати необхідну кількість аналогових та дискретних входів-виходів. До АСР нагрівального колодязя не ставиться вимога до високої точності вимірювання температур в топці колодязя. Похибка інформаційного вимірювального може бути 10°C . Для інформаційного каналу встановлена максимальна похибка вимірювання у $\Delta_{\text{max}} = 15^{\circ}\text{C}$.

На інформаційні канали встановлено наступні похибки вимірювання:

1. температура:

—	палива	2°C
—	повітря	2°C
—	в топці колодязя	10°C

2. надлишковий тиск:

—	палива	1%
—	повітря	1%
—	топки колодязя	1%

3. витрата:

—	палива	2%
—	повітря	2%
—	вихідних газів	2%

Для реалізації функцій верхнього рівня необхідно реалізувати SCADA-систему, за допомогою якої можна відслідковувати значення всіх технологічних параметрів та їх зміну в часі, змінювати завдання для контурів регулювання. В SCADA-системі повинні відображатися повідомлення про аварійні ситуації, технологічна сигналізація та повинна бути база даних для архівації значень технологічних параметрів, подій, сигналізації, аварій.

3. Забезпечення показників якості регулювання.

У розробленій системі реалізовано три контури регулювання для яких ставляться наступні вимоги: для всіх контурів необхідно забезпечити мінімальне динамічне відхилення по каналу 'збурення - вихід' та зменшення часу регулювання, для забезпечення стійкості та надійності процесу генерації електроенергії. Чим стабільніші показники параметрів вимірювання, тим оптимальніше працює виробництво і менші затрати.

4. Використання стандартних інтерфейсів (RS 485, Ethernet) передачі інформації на базі відкритих протоколів обміну даними.

5. Вимоги щодо ведення архіву та форми звітності.

Повинна здійснюватися архівація значень усіх технологічних параметрів, а також інформація про спрацювання технологічної сигналізації, аварійної сигналізації, спрацювання захистів та блокування.

При цьому значення технологічних параметрів повинні вноситись до архіву кожні 5с та при зміні значення кожного параметру. Дані про спрацювання сигналізації, захистів та блокування вносяться до архіву одразу після виникнення даних подій. До архіву вносяться також дата та час доби, коли було записано технологічний параметр або інформація про інші події, дані про оператора (його ПІБ), який перебував в той час на зміні. При спрацюванні технологічної або аварійної сигналізації також архівується назва та значення параметра, що спричинив спрацювання сигналізації. При спрацюванні захистів та блокування архівуються також значення та назви технологічних параметрів при яких мали місце дані події.

При формуванні звітів про події, спрацювання захистів та блокувань і сигналізації необхідно вказувати дату та час їх виникнення, інформацію про оператора, що перебував на зміні. Також необхідно вказати значення технологічних параметрів, причини виникнення даних ситуацій, заходи, що були вжиті для повернення технологічного процесу до номінального режиму та час відновлення роботи технологічних агрегатів.

6. Вимоги щодо своєчасного оповіщення персоналу про нештатні ситуації. Оповіщення персоналу про виникнення нештатних ситуацій повинне здійснюватися одразу після виникнення подібних ситуацій. А саме повинна старцювати сигналізація безпосередньо на робочому місці оператора за допомогою SCADA-системи, де оператор повинен виконати послідовність дій, що описана у інструкції. Після припинення нештатної ситуації управління процесом плавки переводиться у автоматичний режим.

7. Вимоги щодо керування об'єктом у ручному режимі.

За допомогою відповідних технічних засобів повинна бути реалізована можливість керування технологічним об'єктом в ручному режимі. Для цього

на щиті керування необхідно встановити блоки ручного керування електроприводами регулюючих клапанів, що встановлені на технологічних трубопроводах. За допомогою блоків ручного керування обслуговуючий персонал повинен мати змогу перевести контур керування в ручний режим, здійснювати індикацію положення виконавчих механізмів та керувати положенням виконавчих механізмів, таким чином реалізувати керуючі впливи.

Для керування електродвигунами, що регулює положення фурми повинно бути встановлені блоки керування та захисту електродвигунів, які дозволяють керувати їх роботою вручну та дистанційно.

8. Вимоги щодо відображення інформації про хід технологічного процесу. Інформація про хід технологічного процесу повинна відображатись у вікні мнемосхеми, де повинне відображатись технологічне обладнання, значення усіх технологічних параметрів, трубопроводи та напрямки руху матеріальних потоків. В реальному часі повинні відображатись графіки зміни технологічних параметрів, а також графіки історичних значень технологічних параметрів.

9. Вимоги щодо технологічного захисту та блокування.

Автоматичний захист призначений для запобігання аварії обладнання у випадку відхилення параметрів за допустимі границі або при відмові окремих елементів устаткування. Захист вступає в дію у тому випадку, коли можливості автоматичного або дистанційного керування по запобігання відхилень параметрів за встановлені межі вичерпано, а оператор не в змозі вчасно на це реагувати.

Нагрівальний колодязь автоматично зупиняється від наступних сигналів:

- вихід з ладу або зупинка вентиляторів повітря;
- вихід з ладу або зупинка вентилятора димососу;
- перевищення тиску у газопроводі;
- вихід температури в зоні випалювання за допустимі межі.

При спрацюванні автоматичного захисту керуючий сигнал від контролера надходить через реле до запірних засувок та відсічних клапанів, що перекривають надходження палива до пальників. Відсічні клапани спрацьовують миттєво.

10. Вимоги щодо надійності системи автоматизації.

Надійність функцій АСУ ТОВ характеризується середнім напрацюванням на відмову $T_{сер}$ або ймовірність безвідмовної роботи $P_c(\tau)$; середнім часом відновлення T_{θ} та ймовірністю безвідмовної роботи з урахуванням відновлення $P_c(\tau)$ для керуючої функції; коефіцієнтом готовності для захисних функцій.

Функції АСУ ТП повинні відповідати показникам надійності, а саме

1. Середнє напрацювання на відмову для усіх функцій $T_{сер} > 1000 год$;
2. Середній час відновлення для керуючої функції $T_{\theta} < 4 год$;
3. Коефіцієнт готовності для захисної функції $K_{гот} > 0.998$.

3.3 Опис інформаційного забезпечення ПТКЗА

Перелік всіх інформаційних каналів з зазначенням вимог до точності отримання значень параметрів, типів використовуваних параметрів сигналів і функцій наведені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 Перелік інформаційних каналів

Параметр	Межі виміру	Похибка	Сигнал	Функції
Витрата палива	0 – 1600 м³/год	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація, регулювання, захист і блокування
Витрата повітря	0 – 2200 м³/год	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація, регулювання, захист і блокування
Температура в топці	-30 – 1200 °C	10°C	4–20мА	Контроль, сигналізація, регулювання, захист і блокування
Тиск вихідних газів	30 – 40 Па	1%	4-20мА	Контроль, сигналізація, регулювання, захист і блокування
Температури повітря на вході	25 – 30 °C	1°C	4-20мА	Контроль, сигналізація
Температури палива на вході	25 – 30 °C	1°C	4-20мА	Контроль, сигналізація
Температура вихідних газів	0 – 1000 °C	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація

Тиск в топці колодязя	30 – 40 Па	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація
Положення виконавчого механізму витрати повітря	0 – 100%	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація
Положення виконавчого механізму витрати палива	0 – 100%	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація
Положення виконавчого механізму температури в топці	0 – 100%	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація
Положення виконавчого механізму тиску вихідних газів	0 – 100%	1%	4–20мА	Контроль, сигналізація

Технічні засоби автоматизації, що здійснюють контроль наведені у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 Технічні засоби автоматизації

Параметр	Прилад	Робочий діапазон	Сиг.	Поз.
Витрата палива	Витратомір FUG1010, токовий вихід 4-20 мА, цифровий вихід 3-30 В, температура навколишнього середовища (- 20 - + 50 °С), клас точності 0,5.	1500 м³ /год	4–20мА	16

Витрата повітря	Витратомір FUG1010, токовий вихід 4-20 мА, цифровий вихід 3-30 В, температура навколишнього середовища (- 20 - + 50 °С), клас точності 0,5.	2100 м³/год	4–20мА	1а
Температура в топці	Оскільки дані з приладу не застосовуються для безпосереднього керування температурою теплоносія, його клас точності дорівнює 0.2. Номінальна потужність на виході – 1300 кВт.	-30-1200 °С	4–20мА	3а
Тиск вихідних газів	Датчика тиску XMLK100P2D23 Діапазон вимірювання 0-100 Па, клас точності: 0,01	30 Па	4-20мА	2а
Тиск в топці	Датчика тиску XMLK100P2D23 Діапазон вимірювання 0-100 Па, клас точності: 0,01	30 Па	4-20мА	2б
Тиск повітря на вході	Датчик тиску НМП-У2-6 КПА – 1,5 - М20Х 1,5 Діапазон вимірювання 0 – 4кПа	3 кПа	4-20мА	4а
Тиск палива на вході	Датчик тиску НМП-У2-6 КПА – 1,5 - М20Х 1,5 Діапазон вимірювання 0 – 4кПа	3 кПа	4–20мА	4б

Температура повітря на вході	Електричний термометр. Діапазон вимірювання -50 - 110 °С, похибка 1 °С, точність 0,1 °С	30 °С	4–20мА	4в
Температура Палива на вході	Електричний термометр. Діапазон вимірювання -50 - 110 °С, похибка 1 °С, точність 0,1 °С	30 °С	4–20мА	4г
Температура вихідних газів	Оскільки дані з приладу не застосовуються для безпосереднього керування температурою теплоносія, його клас точності дорівнює 0.2. Номінальна потужність на виході – 1300 кВт	1000 °С	4–20мА	4д

Для забезпечення можливостей розширення та модернізації системи автоматизації контролер повинен підтримувати підключення додаткових модулів вводу-виводу, мати декілька інтерфейсів обміну даними для реалізації мережевої взаємодії. Для забезпечення виконання всіх функцій автоматизації контролер повинен мати достатню кількість точок вводу-виводу, а саме:

- Кількість аналогових входів - не менше 14, для підключення всіх аналогових датчиків.
- Кількість дискретних виходів – не менше 4.

3.4 Розробка структури ПТКЗА

Для вибору відповідного контролера необхідно порівняти декілька контролерів, параметри яких задовольняють поставленим вимогам. Для

порівняння було обрано контролери Siemens S7-1500, Phoenix Contact серія 300 та Honeywell MasterLogic-200.

Таблиця 3.4. Порівняльна характеристика засобів автоматизації

Контролер	Входи	Виходи	Інтерфейс/ протокол обміну	Програмне забезпечення та інше	Ціна, грн
Siemens Simatic S7-1500 CPU 1511- 1 PN (19772 грн)	Модуль аналогового вводу 8 AI SM 531 – 2 шт. (22234 грн) Модуль дискретного виводу/виводу - 1 шт. (13526 грн)	Модуль аналогового виводу 8 AO SM 532 – 1 шт. (21543 грн)	PROFINET, PROFIBUS DP	Simatic Step7 V13 (36271 грн) WinCC (31661 грн) Сенсорна панель TP1200 Comfort (53843 грн)	198850
Honeywell MasterLogic -200 2MLR- CPUH/T (22578 грн)	Модуль аналогового вводу 8 AI 2MLF-AV8A (Voltage Input Type) – 2шт. (21362 грн) Модуль дискретного вводу 10 XIO- 10DI/U– 1шт.(12407 грн)	Модуль аналогового виводу 4 AO 2MLF-DV4A – 1шт. (24670грн) Модуль дискретного виводу 8 DO 2MLQ - RY1A – 1шт.(8886 грн)	USB12MB PS and RS-232-C, Ethernet/ Modbus	Панель оператора Galaxy Touchcenter Plus (33641 грн) Experion HS (33808 грн) NiagaraNx (38212 грн)	195564
Phoenix Contact	Вбудовані: 8 DI	Вбудовані: 4 DO	RS-232-C, Ethernet/	PC WORX (41228 грн)	190490

ILC 300 (40415 грн)	Модуль аналогового вводу IB IL AI 8/EF-PAC – 2 шт. (24700 грн)	Модуль аналогового виводу IB IL AO 4/U/BP-PAC – 1 шт. 4 AO (21400 грн)	Interbus	Сенсорна панель TP121STM (23502 грн) mySCADA (39245 грн)	
------------------------	--	---	----------	--	--

Характеристики модульного контролера Phoenix Contact серія ILC300:

- висока гнучкість завдяки можливості розширення модулів вводу-виводу;
- комунікація PROFINET в реальному часі;
- Інтегрований інтерфейс Ethernet;
- Вбудований веб-сервер для візуалізації за допомогою WebVisit;
- FTP-сервер;
- Підтримка численних комунікаційних протоколів: HTTP FTP, SNMP, SMTP. SQL. MySQL і ін.;
- Розробка за допомогою PC Worx (IEC 61131-3).

Пам'ять для постійного зберігання даних – 64 кбайт (NVRAM).

У складі програмованого контролера S7-1500 може використовуватись кілька типів CPU стандартного призначення, а також F-CPU для побудови систем протиаварійного захисту і забезпечення безпеки. Всі типи центральних процесорів S7-1500 оснащені інтерфейсом PROFINET з вбудованим 2-канальним комутатором і підтримкою обміну даними в режимах RT і IRT. Центральні процесори S7-1500 оснащені робочою пам'яттю досить великого

обсягу, фізично розділеної на області пам'яті програми і пам'яті даних. Використовуються карти пам'яті SIMATIC Memory Card від 4 Мбайт до 32 Гбайт.

MasterLogic ПЛК є компактним контролером, який характеризується надійністю і продуктивністю під час управління. ПЛК MasterLogic модульні і масштабовані. Надійний процесор робить його внутрішньо потужним. Навіть складні програми обробляються з цією постійною швидкістю. Виділені модулі введення/виведення інформації доповнюють основний процесор.

Ключові особливості:

1. Потужний процесор - швидкість обробки логічної базової операції 42 нс/крок, чисел з одиничною точністю 600-1106 нс/крок, чисел з подвійною точністю 1078-2394 нс/крок; програма 7МВ (в тому числі пам'ять системи); системна пам'ять 4 Мб; пам'ять даних 2 Мб; 16МВ вбудованої флеш-пам'яті для програм і даних.
2. Підтримка стандарту IEC61131-3, програмування мовами LD / SFC / ST / IL.
3. Велика бібліотека стандартних функціональних блоків.
4. Більше 50 типів модулів введення/виведення.
5. Відкриті мережеві протоколи з польовими пристроями - Profibus, Modbus (Ethernet & Serial).
6. Відкрита комунікація із зовнішніми системами - Ethernet, послідовний RS-232 / RS-422.
7. Самодіагностика - мережева діагностика, системні журнали, автоматичне сканування, система моніторингу.
8. Симуляція для тестових програм в автономному режимі без ПЛК.

Для реалізації контролерної автоматизації було обрано контролер S7-1500. Перевагами даного типу контролерів перед ILC300 Phoenix Contact та Honeywell MasterLogic-200 є висока продуктивність, потужні комунікаційні можливості: протокол ProfiNet, наявність 2 канального комутатора; вбудована системна діагностика; реєстрація(архівування) даних, можливість роботи в жорстких промислових умовах - діапазон температур від 0 до 60 °С, відносна вологість від 5 до 95% високі вібраційні та ударні навантаження.

Нижній рівень АСУ являє собою контролер з вимірювальною та виконавчою апаратурою. Контролер отримує інформацію з датчиків, отримане поточне значення порівнюється із завданням і регулятором розраховується керуюча дія на регулюючий клапан. Регулювання тиску здійснюється за допомогою відкриття РО, що пропускає шлакові гази. Регулювання витрати палива і повітря здійснюється за допомогою відкриття РО.

Верхній рівень – супервізорний. HMI/SCADA – система є основою верхнього (супервізорного) рівня системи керування. Супервізорний рівень ПТК АСУТП поділяється на 2 рівні: серверний та клієнтський. Клієнт–серверна архітектура ПТК дає змогу відділити отримання даних та їх обробку від віртуалізації. В якості SCADA системи використовується WinCC.

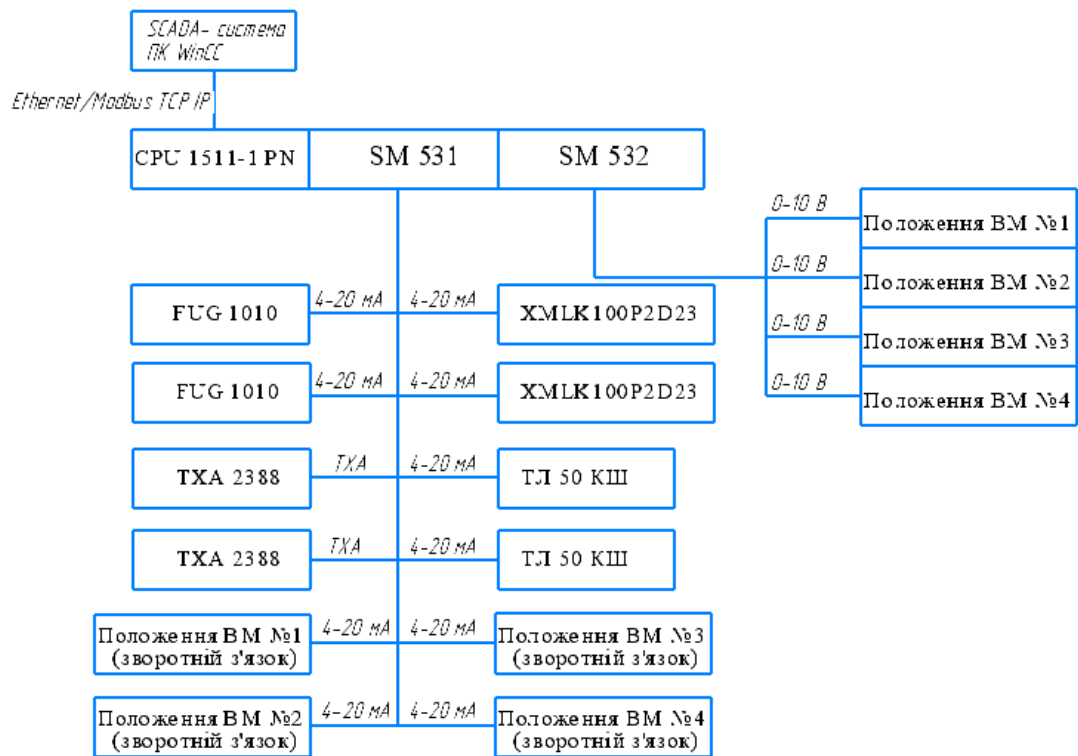


Рис.3.1. Структура ПТК3А4

3.5 Розрахунок надійності функціонування

Кожний елемент структурної схеми надійності характеризується інтенсивністю відмов $\lambda, 1/\text{год}$ або середнім часом напрацювання на відмову

$T_{\text{сер}} = \frac{1}{\lambda}, \text{год}$. Ці дані наведені в таблиці 3.5. Найменш надійний інформаційний

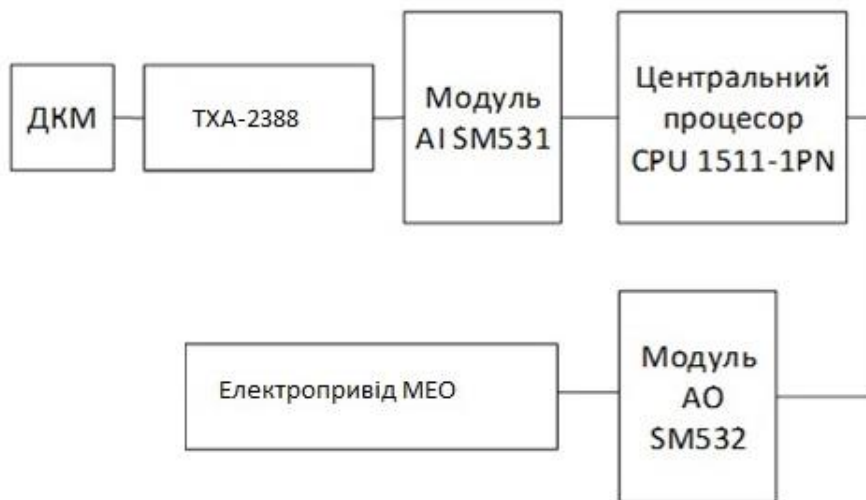
канал – вимірювання температури в топці колодязя. Структурна схема інформаційної функції для даного каналу зображена на рис. 3.2. Решта інформаційних каналів будуть володіти більшою надійністю функціонування.



Рис. 3.2 Схема надійності вимірювання температури в топці колодязя

Найменш надійний представник регулюючої функції – контур регулювання температури в топці колодязя, оскільки він включає найменш надійний елемент у системі. Структурна схема регулюючої функції зображена на рис.3.4.

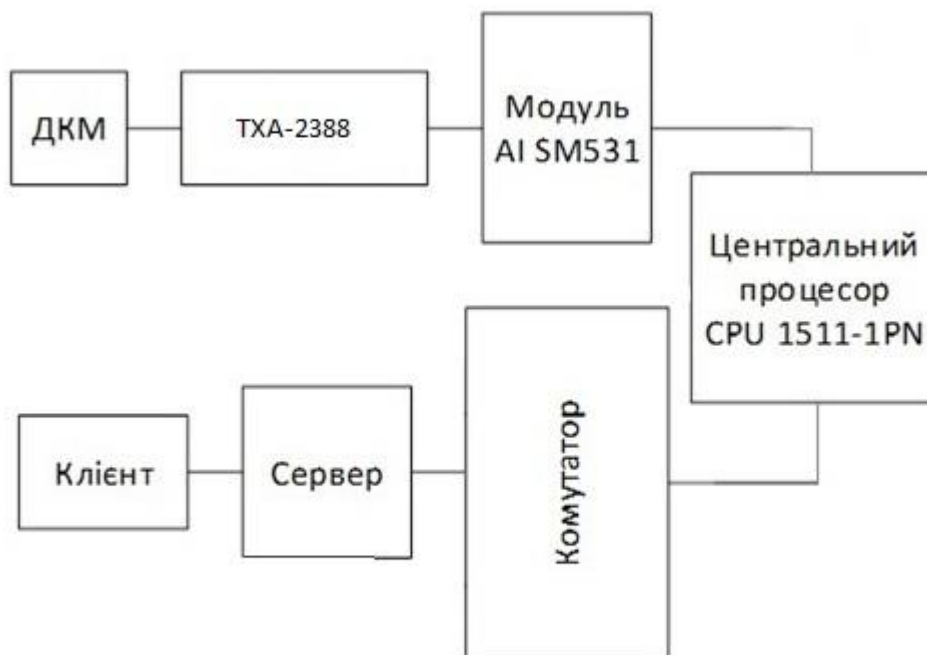
Структурна схема регулюючої функції



ДКМ – деталі кріпильного монтажу

Рис.3.4 Структурна схема регулюючої функції

Структурна схема функції сигналізації



ДКМ – деталі кріпильного монтажу

Рис.3.5 Структурна схема функції сигналізації

Таблиця 3.5 Показники надійності елементів АСУТП колодязя

Елемент	$\lambda \cdot 10^6, 1/\text{год}$	$T_{\text{сер}}, \text{год}$
Витратомір FUG1010	66,67	15000
Термопара ТХА-2388	133,33	7500
Датчик тиску XMLK100P2D23	66,67	15000
Модуль аналогового вводу SM531	29,4	34000
Центральний процесор CPU 1511-1PN	29,4	34000
Модуль аналогового виводу SM532	29,4	34000
Модуль дискретного виводу SM522	29,4	34000
Пускач ІСТ	100	10000
Електропривід МЕО	50	20000
Комутатор	20	50000
Сервер вводу\виводу	12,5	80000
Клієнт (ПК)	20	50000
Сенсорна панель	23,15	43200
ДКМ (деталі кріпильного монтажу)	1,43	700000

Розрахуємо загальну інтенсивність відмов, середній час напрацювання на відмову та ймовірність безвідмовної роботи для найменш надійних представників кожної функції АСР. Отримані результати зведемо в таблицю 3.6. Використані для розрахунку формули:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i; P(\tau) = e^{-\lambda\tau}; T_{\text{сер}} = \frac{1}{\lambda}$$

де n – кількість елементів у структурі надійності; λ – загальна інтенсивність відмов; λ_i – інтенсивність відмов для i -го елемента; $T_{\text{сер}}$ – середнє напрацювання на відмову; $P(\tau)$ – ймовірність безвідмовної роботи за час τ .

Задаємо $\tau = 720 \text{ год}$. Розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи для інформаційної функції в перебігу часу τ :

$$\lambda_1 = 246,03 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}; T_{\text{сер}} = 4064,5 \text{ год}; P(\tau) = 0,83$$

$$\lambda_2 = 236,71 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}; T_{\text{сер}} = 4224,57 \text{ год}; P(\tau) = 0,84$$

Для регулюючої функції розрахуємо ймовірність безвідмовної роботи за час τ з урахуванням відновлення. Задаймо часом відновлення працездатності $T_g = 3 \text{ год}$ та допустимим часом функціонування функції відмови $T_{\text{дон}} = 12 \text{ год}$

$$\lambda = 274,36 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}; T_{\text{сер}} = 3644,8 \text{ год};$$

$$P(\tau) = 0,8207;$$

$$P_b(\tau) = 1 - e^{-12/3} = 0,981$$

Ймовірність безвідмовної роботи на протязі часу, зважаючи на встановлення функції відмови за час T_b :

$$P_c(\tau) = P(\tau) + (1 - P(\tau))P_b(\tau) = 0,8207 + (1 - 0,8207) \cdot 0,9817 = 0,9967$$

Розрахуємо коефіцієнт готовності та ймовірність безвідмовної роботи при виконанні очікуваної задачі для сигналізуючої функції:

$$\lambda = 246,03 \cdot 10^{-6} \text{ 1/год}; T_{\text{сер}} = 4064,5 \text{ год}; P(\tau) = 0,84$$

$$K_{\text{гот}} = T_{\text{сер}} / T_{\text{сер}} + T_b = 0,9998; P_{\text{оч}}(\tau) = P(\tau) \cdot K_{\text{гот}} = 0,84 \cdot 0,9998 = 0,8398$$

Таблиця 3.6 Рівень надійності функцій АСУ ТОУ

Функція	$\lambda \cdot 10^6, \frac{1}{\text{год}}$	$T_{\text{сер}}, \text{год}$	$P(\tau)$
Інформаційна	246,03	4064,5	0,83
Інформаційна	236,71	4224,57	0,84
Регулююча	274,36	3644,8	0,8207
Сигналізації	246,03	4064,5	0,83

Рівень надійності виконання функцій АСК відповідає наступним вимогам:

Середнє напрацювання на відмову для усіх функцій $T_{сер} > 1000 год$;

Середній час відновлення для регулюючої функції $T_{\epsilon} < 4 год$;

3.6 Побудова моделі САК для контуру регулювання температури в топці колодязя

Цей об'єкт належить до об'єктів з самовирівнюванням. Такий об'єкт апроксимується послідовним з'єднанням ланки транспортного запізнення та аперіодичної ланки першого порядку передавальні функції яких $W_T(s)$ та $W_{ап}(s)$ відповідно.

Послідовному з'єднанню відповідає перемноження передаточних функцій, тому передаточна функція об'єкта управління має вигляд:

$$W_{об}(s) = W_{ап}(s) W_T(s) \cdot \frac{K_{об}}{T_{об}s + 1} e^{-\tau_{об}s}$$

В результаті ідентифікації об'єкту, як об'єкту з самовирівнюванням, отримана його модель.

$$\text{Передаточна функція } W(p) = \frac{1.25}{60p + 1} e^{-14p}$$

Розрахунок налаштувань об'єкта

$$\tau_0 = 14 \text{ сек}$$

$$T_{об} = 60 \text{ сек}$$

$$K_{об} = 1,25 \frac{^{\circ}C}{\% PO}$$

Моделювання замкненої САР в MatLab Simulink

За допомогою Matlab Simulink побудуємо модель об'єкта (рис.3.6) та отримаємо перехідну характеристику об'єкта(рис.3.7).

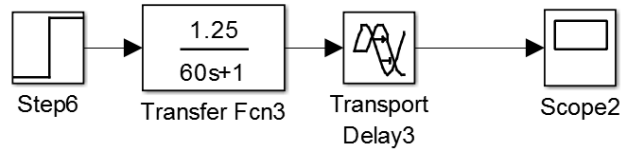


Рис.3.6. Модель системи

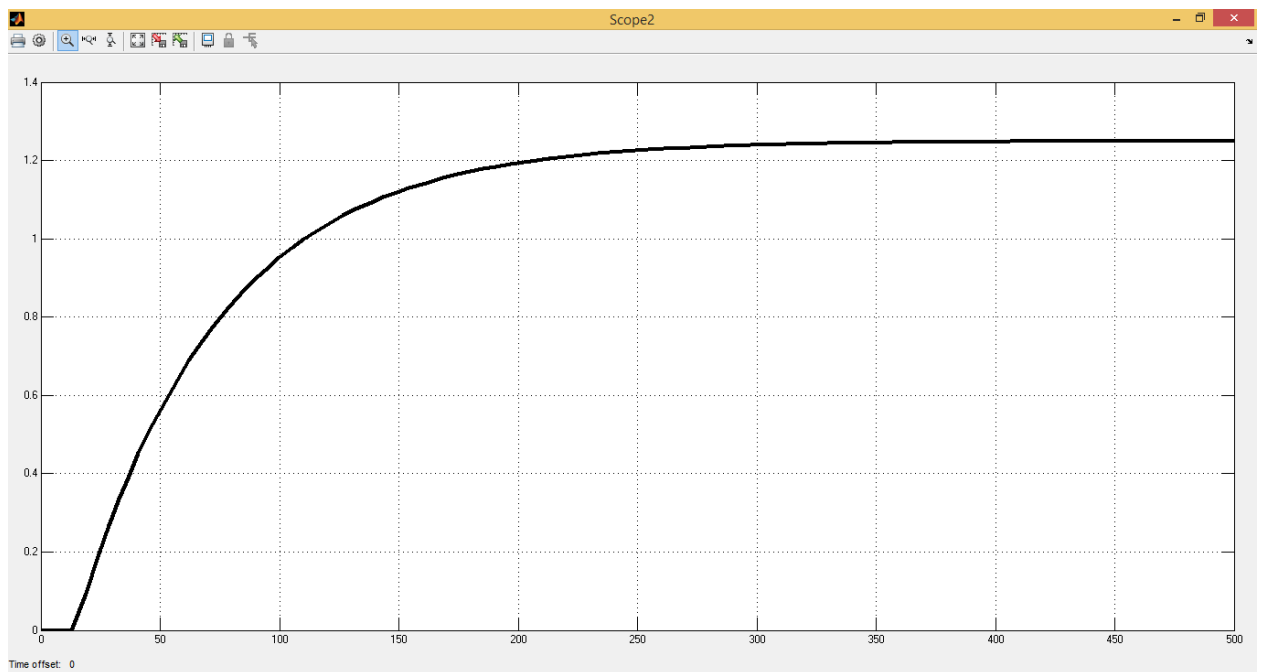


Рис.3.7. Перехідна характеристика об'єкта

3.6.1 Розрахунок параметрів регулятора методом РАФХ

Для побудови РАФХ скористаємося формулами для ПІ-регулятора:

$$K_p = - \frac{P_{o6}(m,w) + mQ_{o6}(m,w)}{A_{o6}^2(m,w)}, \quad (3.1.)$$

$$K_u = -w(m^2 + 1) \frac{Q_{06}(m, w)}{A_{06}^2(m, w)}, \quad (3.2.)$$

$$\text{де } K_u = \frac{K_p}{T_u}, A_{06}(m, w) = \sqrt{P_{06}^2(m, w) + Q_{06}^2(m, w)}.$$

Виберемо перехідний процес із 20% перерегулюванням, якому відповідає $\psi=0,9 \Rightarrow m = \frac{\ln(1-\psi)}{-2\pi} = 0,367$.

Побудуємо АФХ і РАФХ для об'єкта управління за допомогою наступного коду в середовищі MatLab. Результат представлено на рис. 3.8

```
w=0:0.0001:0.6;
p=i*w;
W=(1.25.*exp(-14.*p))./(60.*p+1);
Re=real(W);
Im=imag(W);
m=0.366;
p=w*(j-m);
W1=(1.25.*exp(-14.*p))./(60.*p+1);
Re1=real(W1);
Im1=imag(W1);
plot(Re,Im,Re1,Im1);
xlabel('Re');
ylabel('Im');
grid on;
```

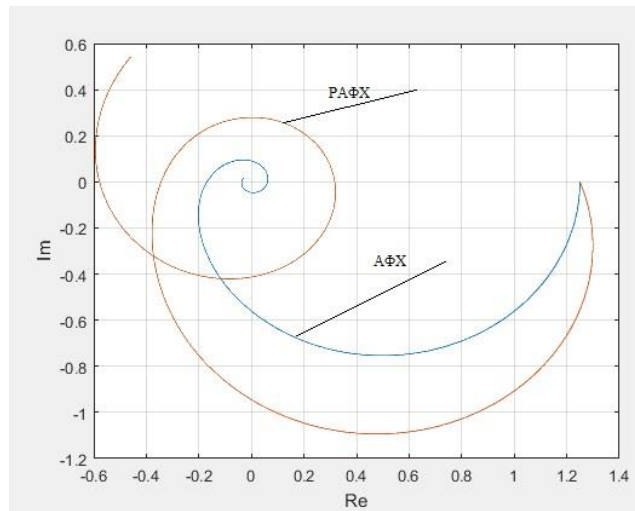


Рис. 3.8 АФХ і РАФХ об'єкта управління

Побудуємо криву заданої степені коливальності за допомогою формул (8.1) та (8.2.) для ПІ-регулятора, яка представлена на рис. 3.9

$m=0.366;$

$w=0:0.0001:0.1;$

$W=(1.25.*\exp(-14*(-m*w+i*w)))/(60*(-m*w+i*w)+1);$

$Re=\text{real}(W);$

$Im=\text{imag}(W);$

$Kp=-(m*Im+Re)/(Im.^2+Re.^2);$

$Ki=-w*(m.^2+1).*Im/(Im.^2+Re.^2); \text{plot}(Kp,Ki,'-k');$

$\text{ylabel}('Kp/Tu');$

$\text{xlabel}('Kp');$

$\text{grid on};$

$\text{hold on};$

$\text{plot}(2.5295, 0.083125, 'ko');$

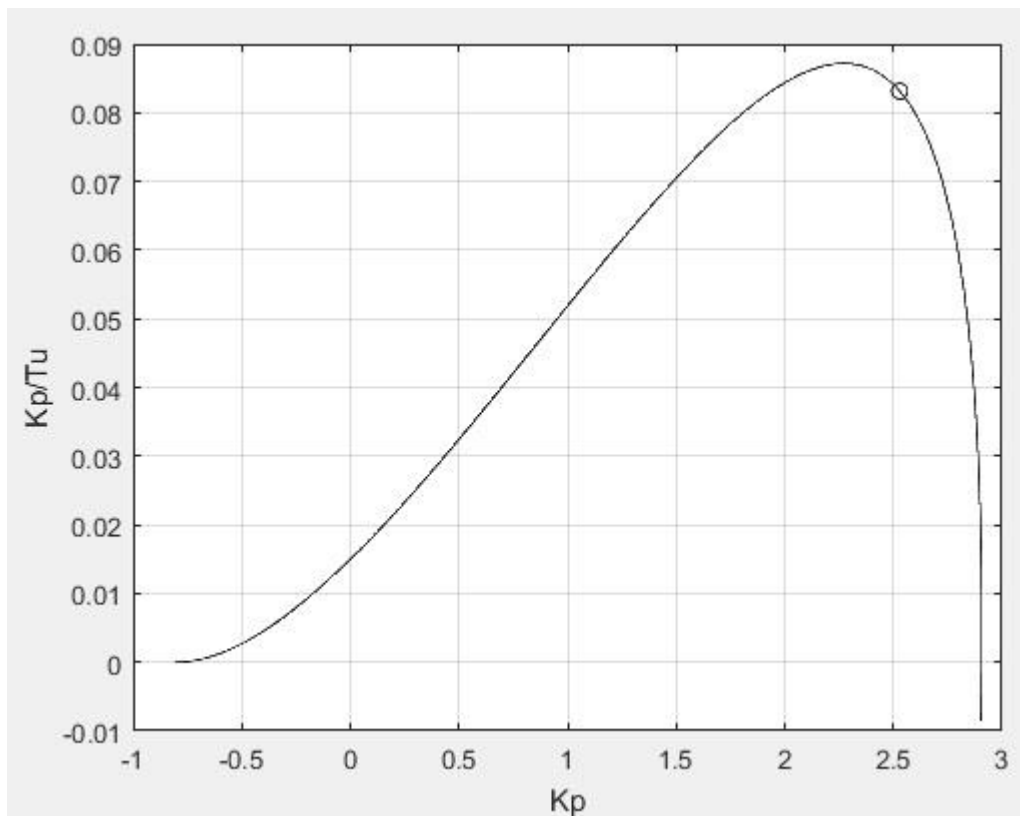


Рис. 3.9 Крива заданого ступеня коливальності $m = 0.367$

Визначимо параметр K_u як $K_u = 0,95K_u^{max}$, для кращого значення інтегрального квадратичного критерію якості перехідного процесу системи.

Отримали такі налаштування регулятора:

$$K_p = 2,5295; K_u = 0.083125; T_u = 30,43;$$

Тепер побудуємо РАФХ розімкнутої системи з отриманими оптимальними налаштуваннями ПІ-регулятора (рис. 3.10):

$$w=0.05:0.0001:0.4;$$

$$m=0.367;$$

$$s=w.*(-m+j);$$

$$Wob=(1.25.*\exp(-14.*s))./(60.*s+1);$$

$$Wr_v=2.5295.*(1+1./(30.43.*s));$$

```

Wrs=Wr_v.*Wob;
Re=real(Wrs);
Im=imag(Wrs);
plot(Re,Im)
grid on
hold on
s=w.*j;
Wob=(1.25.*exp(-14.*s))./(60.*s+1);
Wr_v=2.5295.*(1+1./(30.43.*s));
Wrs=Wr_v.*Wob;
Re=real(Wrs);
Im=imag(Wrs);
plot(Re,Im)
xlabel('Re(w)')
ylabel('Im(w)')

```

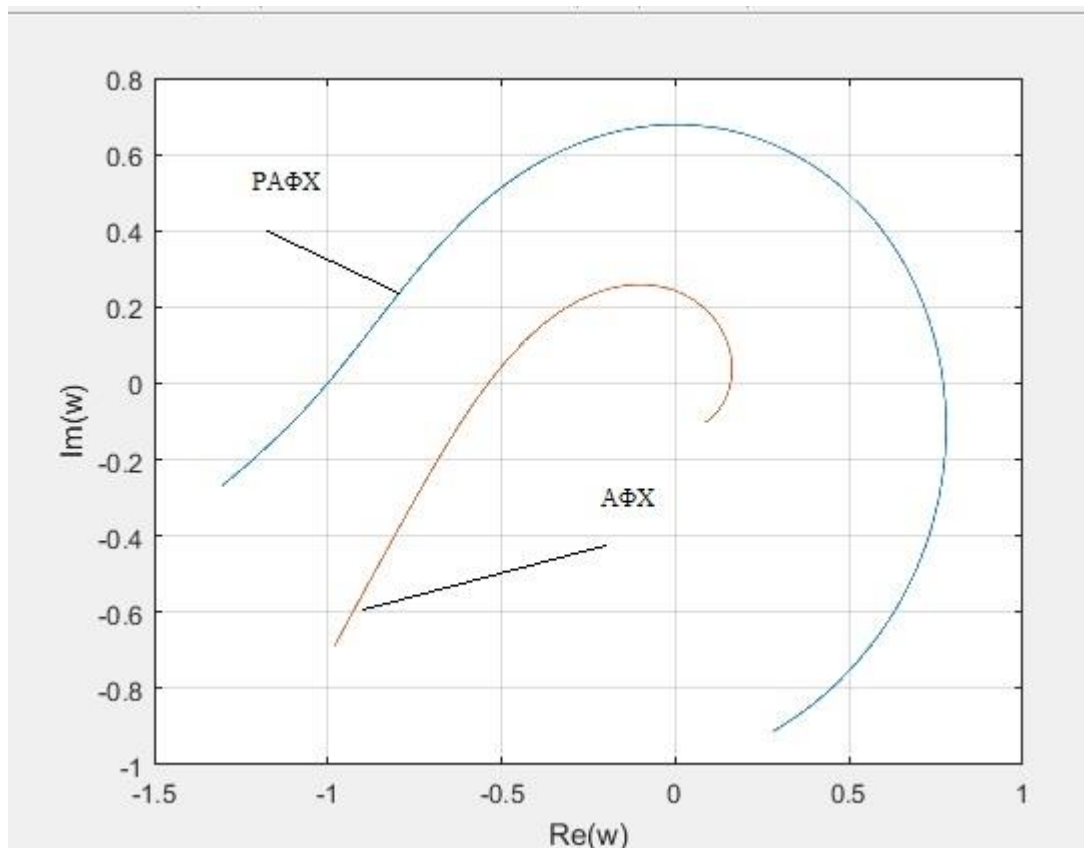


Рис. 3.10. АФХ та РАФХ розімкнутої системи

Як видно із рис. 3.10, РАФХ розімкнутої системи проходить через точку $(-1;j0)$. Це означає, що отримана система буде мати бажаний кореневий показник $m=m^*=0.367$.

Перехідні процеси для одноконтурної системи з ПІ-регулятором з параметрами розрахованими методом РАФХ зображені по каналу «завдання-вихід» на рис. 3.11 та по каналу «збурення-вихід» на рис. 3.12. Прямі показники якості представлені в табл. 3.7.

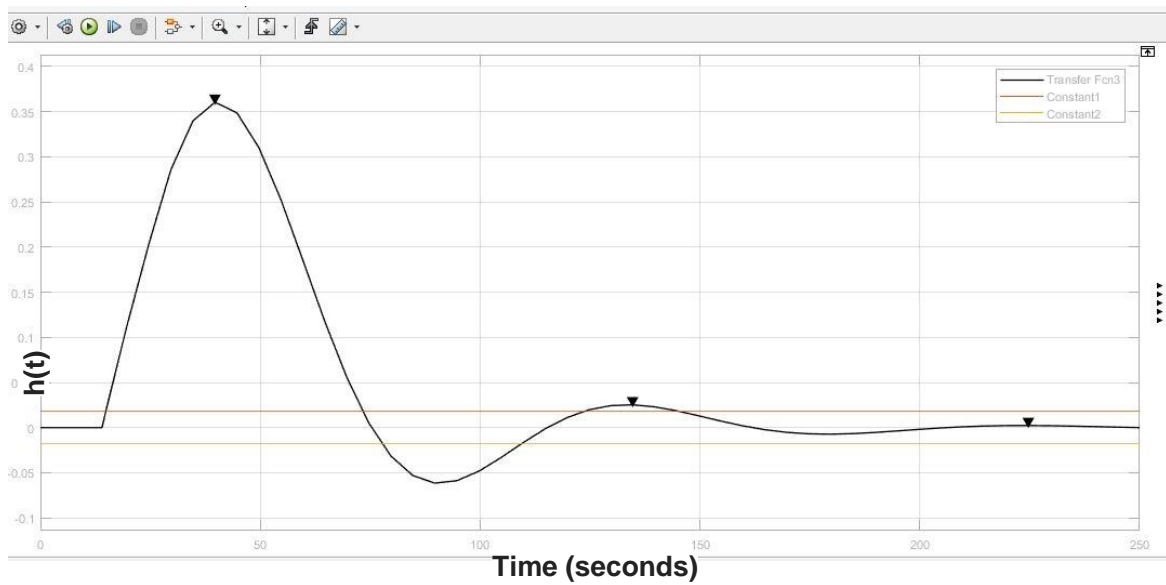


Рис. 3.11. Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

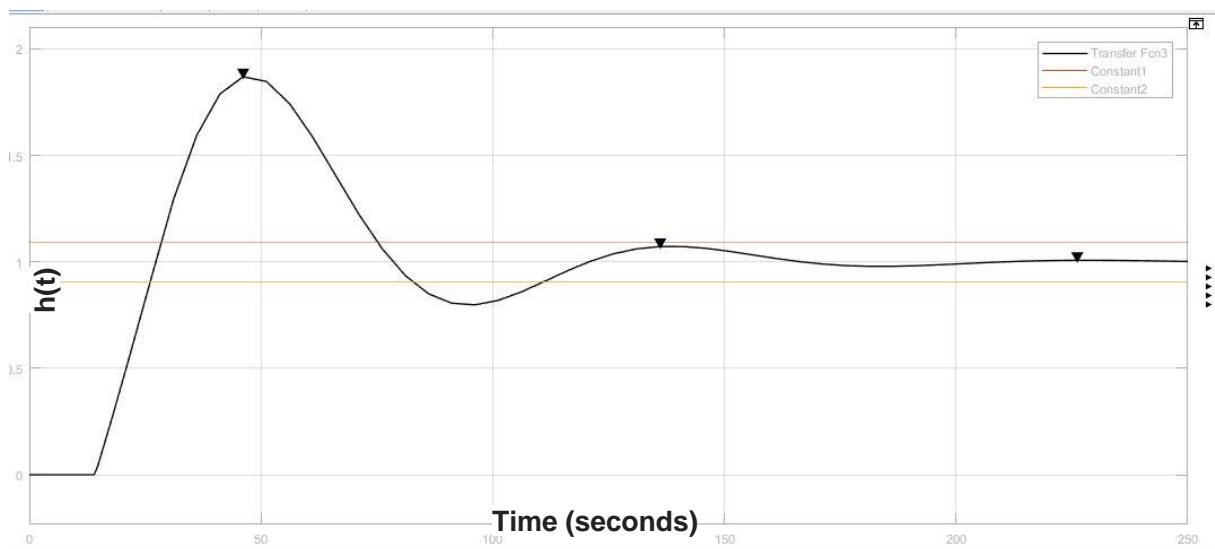


Рис. 3.12. Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.7. Прямі показники якості

Показник	«Завдання-вихід»	«Збурення-вихід»
Статична похибка $\Delta_{ст}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{дин}$	0,866	0,3604

Час регулювання $t_{\text{рег}}, \text{с}$	110,9	145,2
Ступінь затухання ψ	0,42	0,929
Перерегулювання $\sigma, \%$	86,6	7,01

3.6.2 Розрахунок параметрів регулятора методом МАЧХ

Задаємося частотним показником коливальності $M=1.6$, побудуємо АФХ розімкнутої системи при $K_p = 1$ та $T_u = \{30, 35, 40, 45, 50\}$, пряму під кутом, що дорівнює $\beta = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1,6}\right) = 38,68^\circ$ та підберемо для кожного значення параметру T_u коло, центр якого лежить на від'ємній частині реальної осі і яке дотикатиметься і до годографу і до прямої. Годограф, промінь і коло для значень параметру T_u зображені на рис. 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 відповідно.

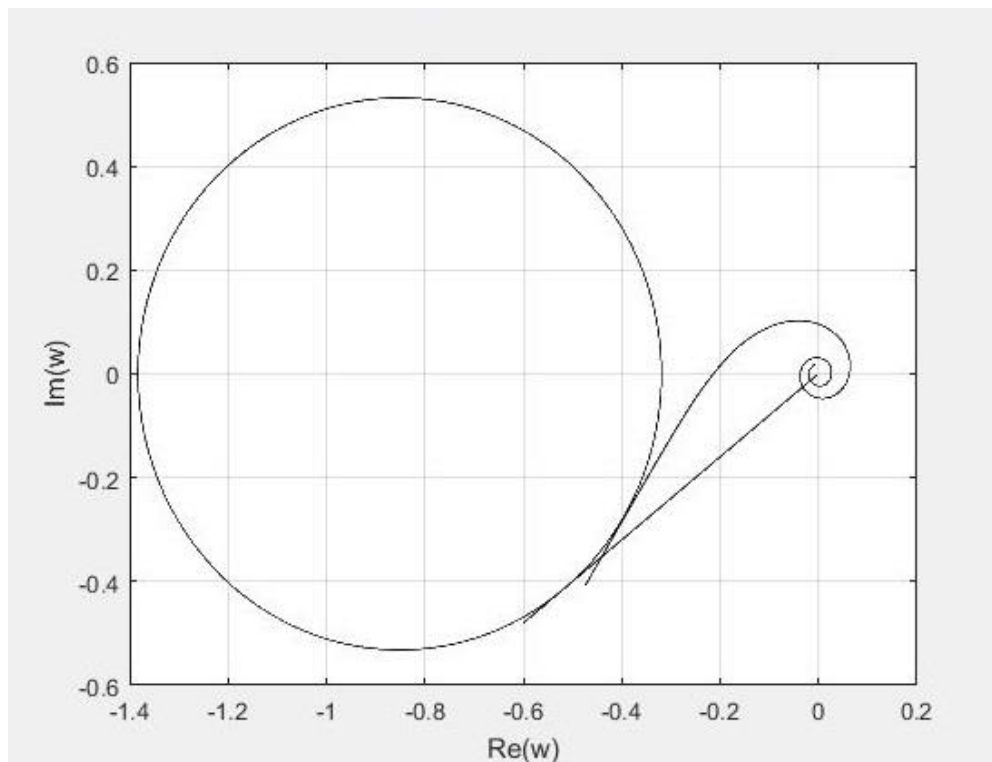


Рис. 3.13 Метод МАЧХ для ПИ-регулятора при $T_u = 30$

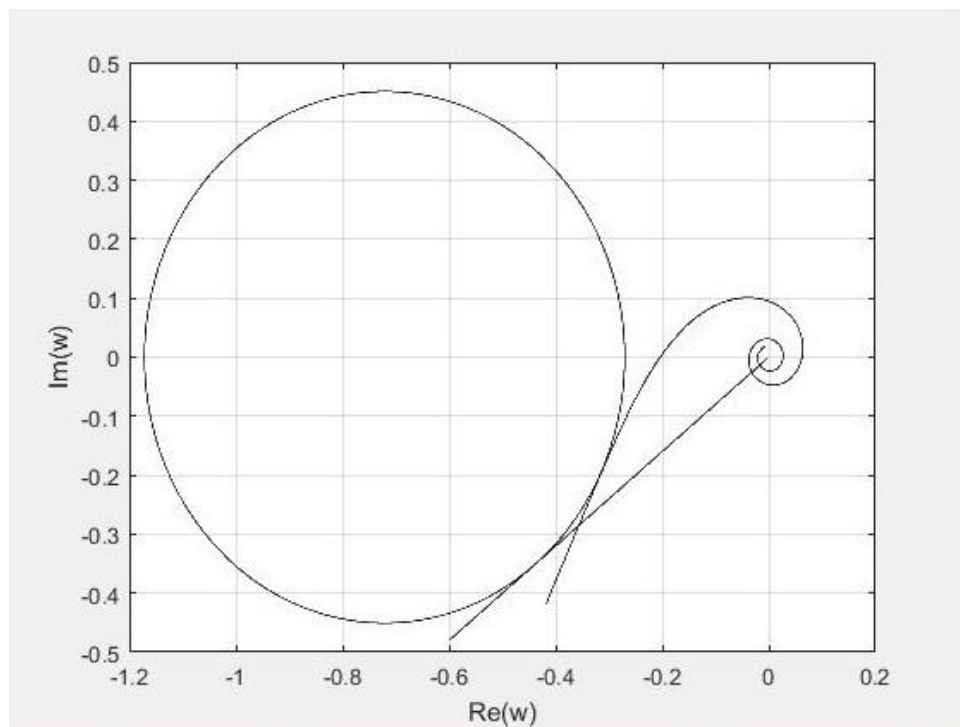


Рис. 3.14 Метод МАЧХ для ПИ-регулятора при $T_u = 35$

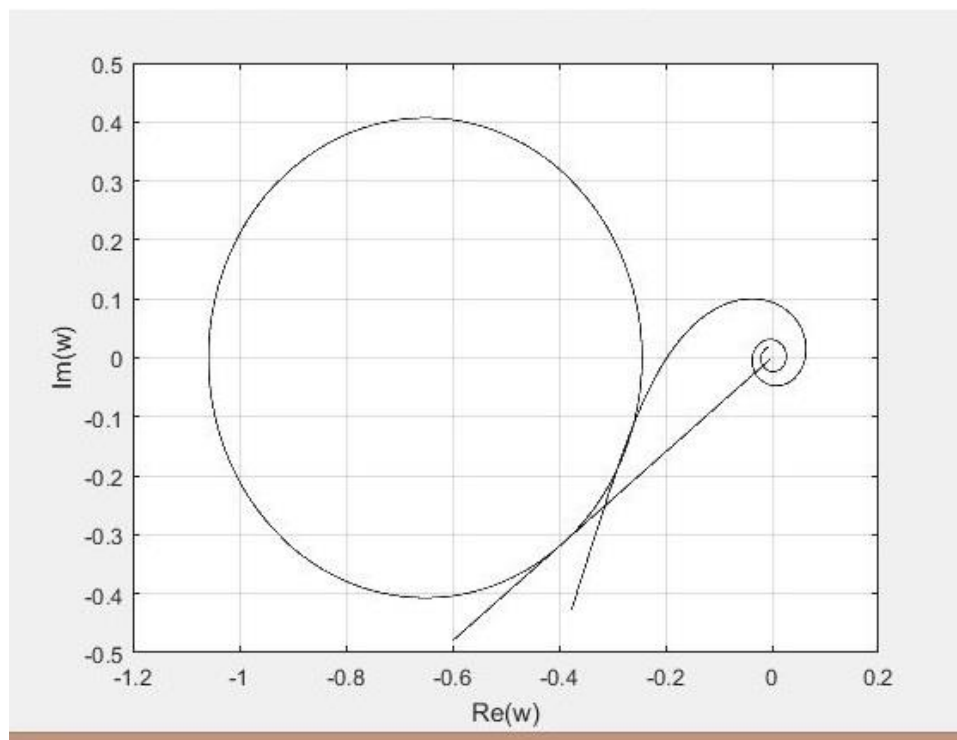


Рис. 3.15 Метод МАЧХ для ПИ-регулятора при $T_u = 40$

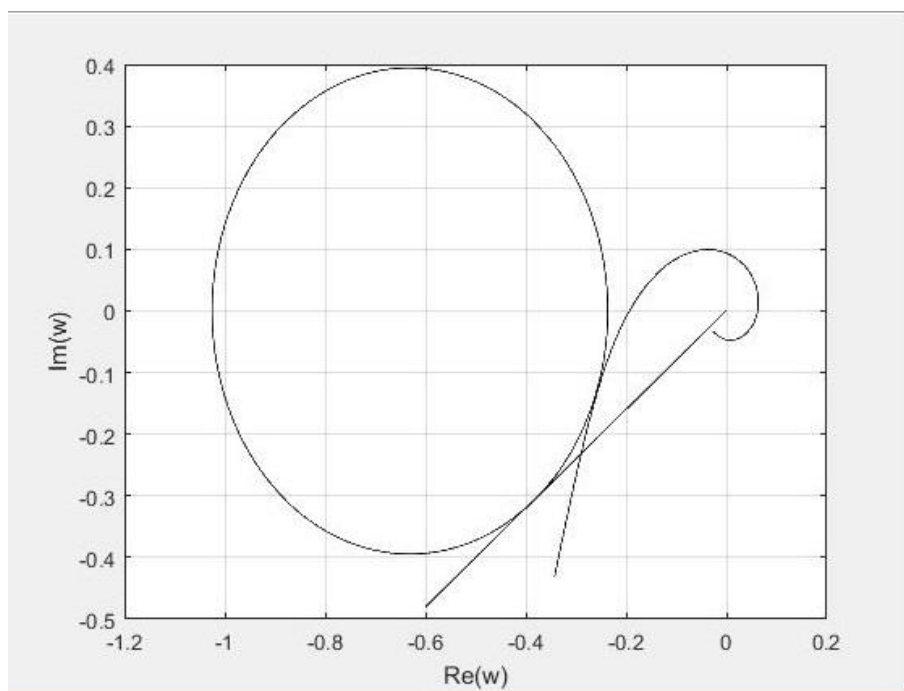


Рис. 3.16 Метод МАЧХ для ПИ-регулятора при $T_u = 45$

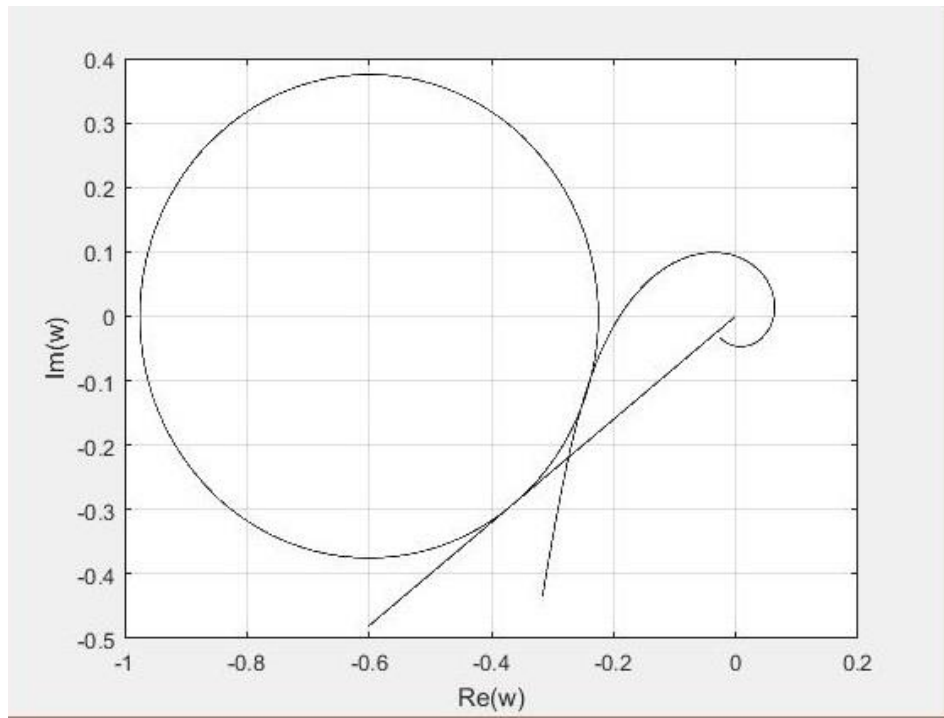


Рис. 3.17 Метод МАЧХ для ПІ-регулятора при $T_u = 50$

Розрахуємо оптимальні значення параметру K_p для кожного значення параметру T_u за формулою:

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1}, \quad (3.3)$$

де r – радіус кола; M – заданий частотний показник коливальності, $M = 1,6$.

1) При значенні $T_u = 30$:

$$r = 0,59319;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,5319} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 1,9283$$

2) При значенні $T_u = 35$:

$$r = 0,4506;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,4506} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 2,276;$$

3) При значенні $T_u = 40$:

$$r = 0,4069;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,305} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 2,5208;$$

4) При значенні $T_u = 45$:

$$r = 0,3944;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,3944} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 2,6007;$$

5) При значенні $T_u = 50$:

$$r = 0,375;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,375} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 2,735;$$

Отримані дані зведемо в табл. 3.8 і побудуємо залежність $K_u = f(K_p)$, яка представлена на рис. 3.18, де

$$K_u = \frac{K_p}{T_u}, \quad (3.4)$$

Таблиця 3.8

K_p	K_u	T_u
1,9283	0,0643	30
2,276	0,065	35
2,5208	0,063	40
2,6007	0,0578	45
2,735	0,0547	50

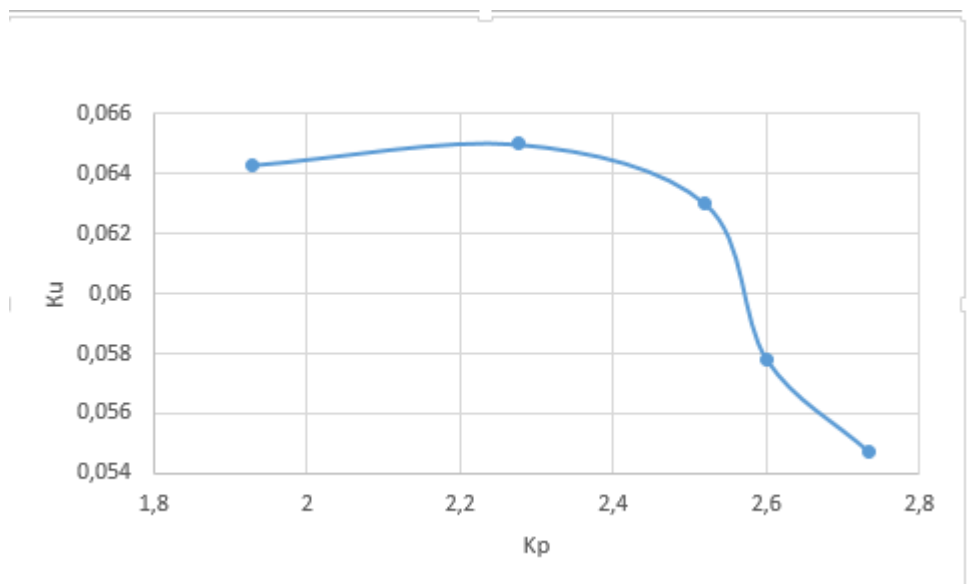


Рис. 3.18 Залежність $K_u = f(K_p)$

Знайдемо оптимальні параметри, виходячи з наведеного графіка залежності на рис. 3.18, які визначаються як максимум даної залежності, тобто $K_u = K_{max}$: $K_p = 2,276$; $T_u = 35$; $K_u = 0.065$;

Побудуємо АЧХ замкнутої системи (рис. 3.19) з даними оптимальними значеннями параметрів за допомогою наступного коду в середовищі MatLab.

```
w=0:0.0001:0.2;  
p=j*w;  
Tu = 35;  
Kreg = 2.276;  
Wreg = Kreg.*(1+1./(Tu.*p));  
Wob=(exp(-14*p).*1.25)./(60.*p + 1);  
Wraz = Wreg.*Wob;  
Wzam = Wraz./(1 + Wraz);  
Re=real(Wzam);  
Im=imag(Wzam);  
A=(Re.^2+Im.^2).^(1/2);  
plot(w,A)  
xlabel('w');  
ylabel('A(w)');
```

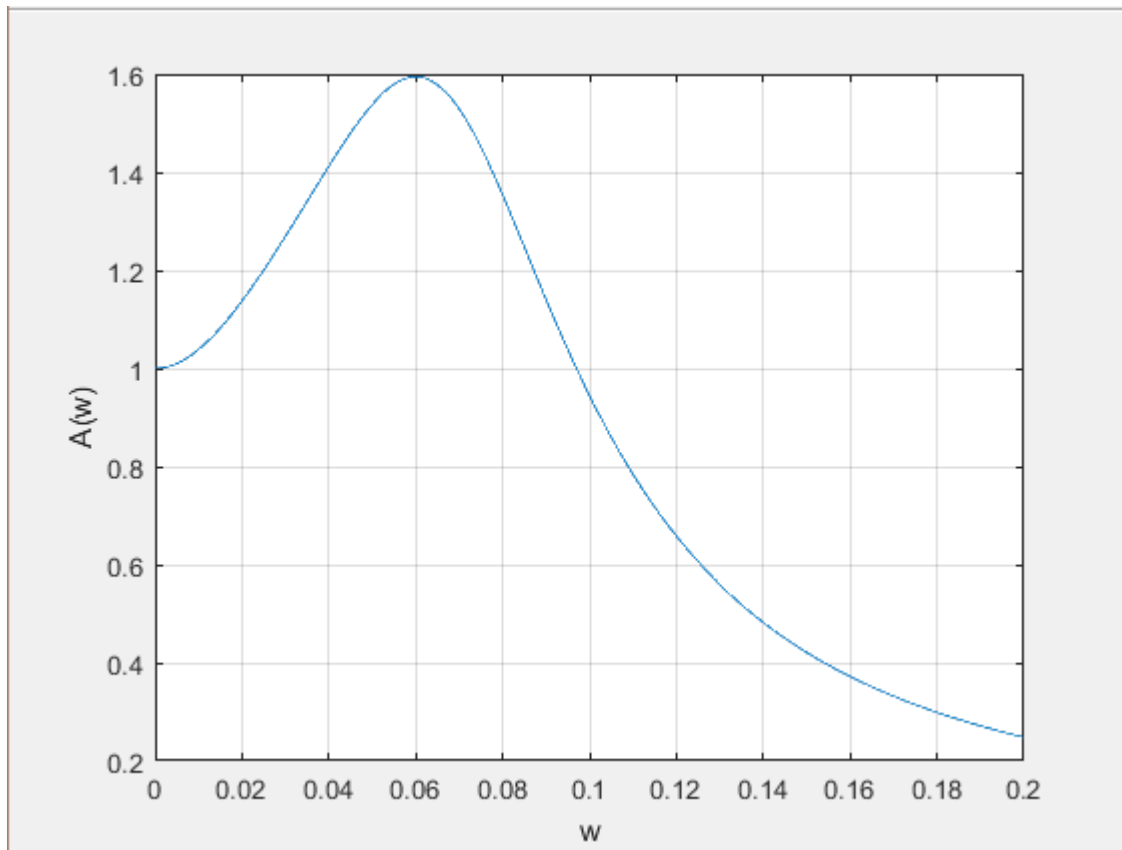


Рис. 3.19 АЧХ системи з ПІ – регулятором при розрахованих оптимальних параметрах регулятора.

Для перевірки отриманих значень параметрів регулятора розрахуємо частотний показник коливальності використовуючи АЧХ зображену на рис. 3.20 та формулу (3.5):

$$M = \frac{A_{3.c.}^{max}(\omega_p)}{A_{3.c.}(\omega_0)}, \quad (3.5)$$

де $A_{3.c.}^{max}(\omega_p)$ – максимальне значення АЧХ замкнутої системи при резонансній частоті, $A_{3.c.}^{max}(\omega_p) = 1,6$; $A_{3.c.}(\omega_0)$ – значення АЧХ замкнутої системи при частоті $\omega_0 = 0$, $A_{3.c.}(\omega_0) = 1$.

$$M = \frac{A_{3.c.}^{max}(\omega_p)}{A_{3.c.}(0)} = \frac{1,6}{1} = 1,6$$

Так як розрахований частотний показник коливальності M рівний заданому частотному показнику при якому були розраховані оптимальні

налаштування ПІ-регулятора, то можна зробити висновок, що розрахунок вірний.

Перехідні процеси для одноконтурної системи з ПІ-регулятором з параметрами розрахованими методом МАЧХ зображені по каналу «завдання-вихід» на рис. 3.20 та по каналу «збурення-вихід» на рис. 3.21. Прямі показники якості представлені в табл. 3.9

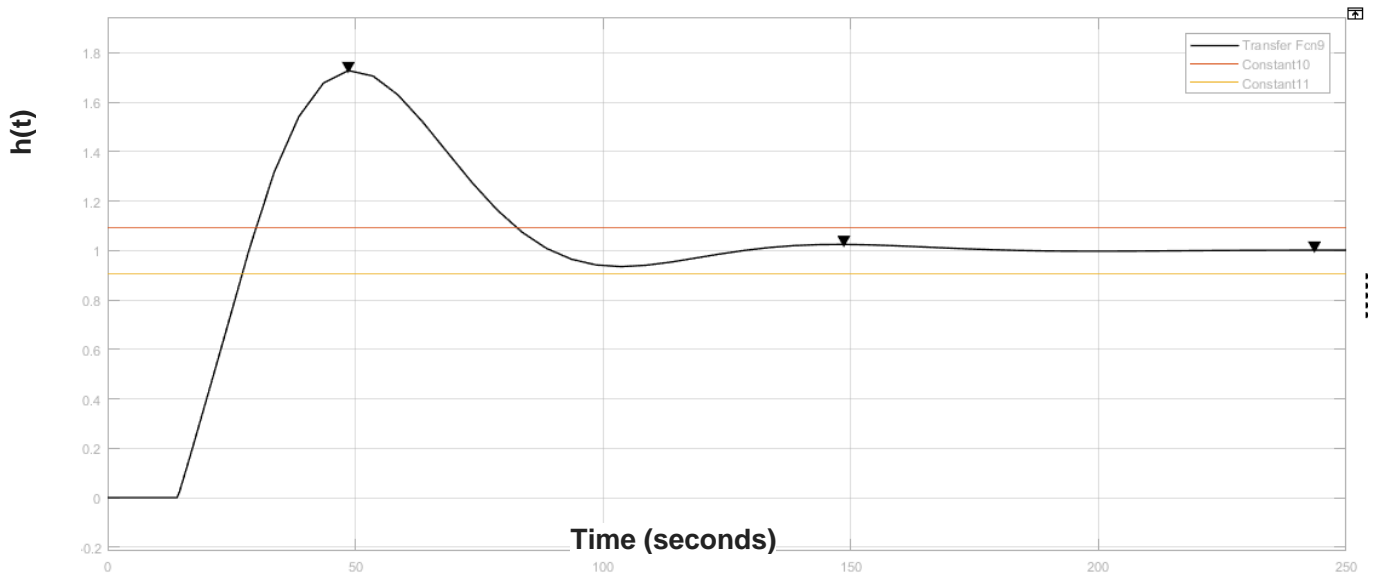


Рис. 3.20 Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

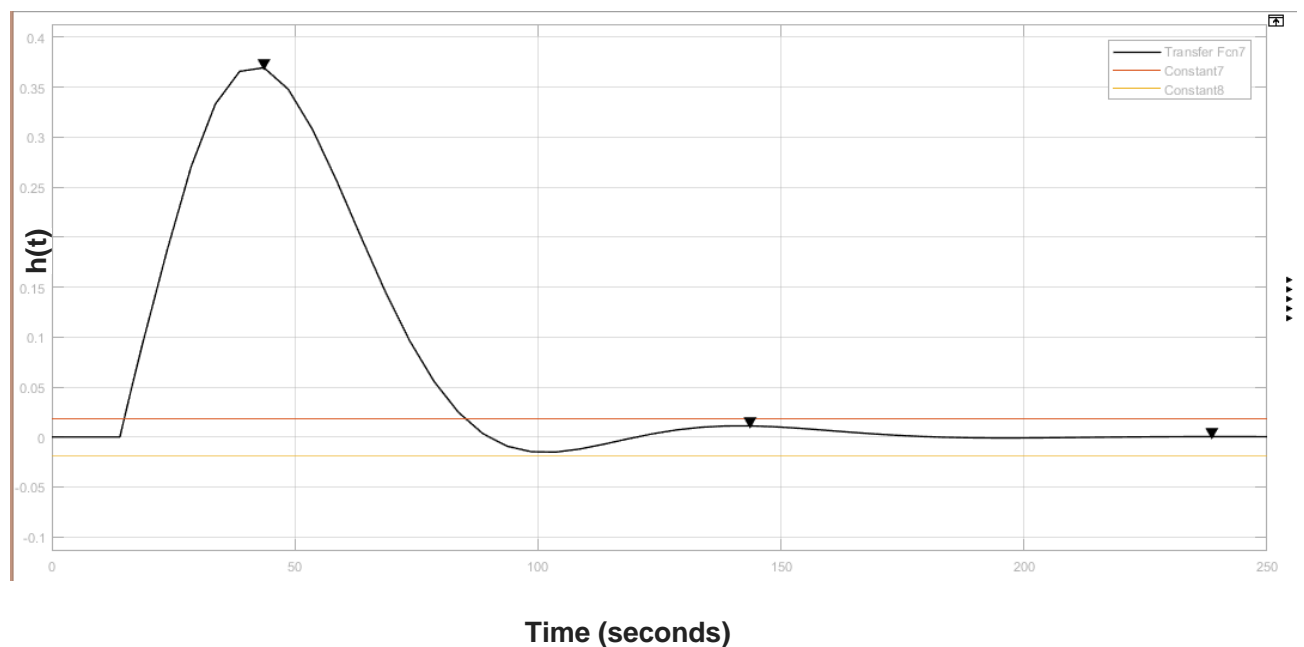


Рис. 3.21 Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.9. Прямі показники якості

Показник	«Завдання-вихід»	«Збурення-вихід»
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0,728	0,3696
Час регулювання $t_{\text{рег}}, \text{с}$	82,8	85,1
Ступінь затухання ψ	0,407	0,9699
Перерегулювання $\sigma, \%$	72,8	3,008

3.6.3 Розрахунок параметрів регулятора інженерним методом

Розрахуємо налаштування ПІ-регулятора інженерним експрес методом для моделі об'єкту типу (3.3) Chien et. Al (1952) – servo[&] для 20% за формулами:

$$K_p = \frac{0,6 \cdot T_m}{K_m \cdot \tau_m}, \quad (3.6)$$

$$T_u = T_m, \quad (3.7)$$

де K_m , T_m , τ_m – коефіцієнт передачі, постійна часу та транспортне запізнення об'єкту регулювання відповідно.

$$K_p = \frac{0,6 \cdot T_m}{K_m \cdot \tau_m} = \frac{0,6 \cdot 60}{1,25 \cdot 14} = 2,057; T_u = T_m = 60.$$

Перехідні процеси для одноконтурної системи з ПІ-регулятором з параметрами розрахованими інженерним методом зображені по каналу «завдання-вихід» на рис. 3.22 та по каналу «збурення-вихід» на рис. 3.23. Прямі показники якості представлені в табл. 3.10.

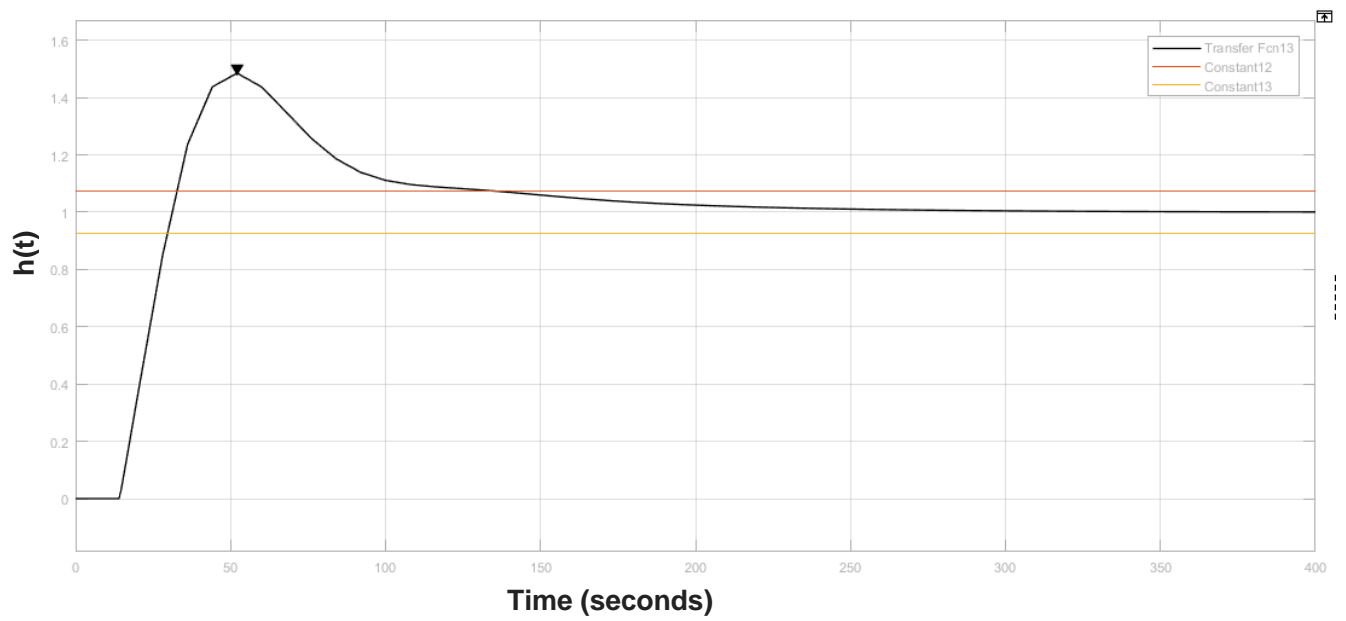


Рис. 3.22. Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

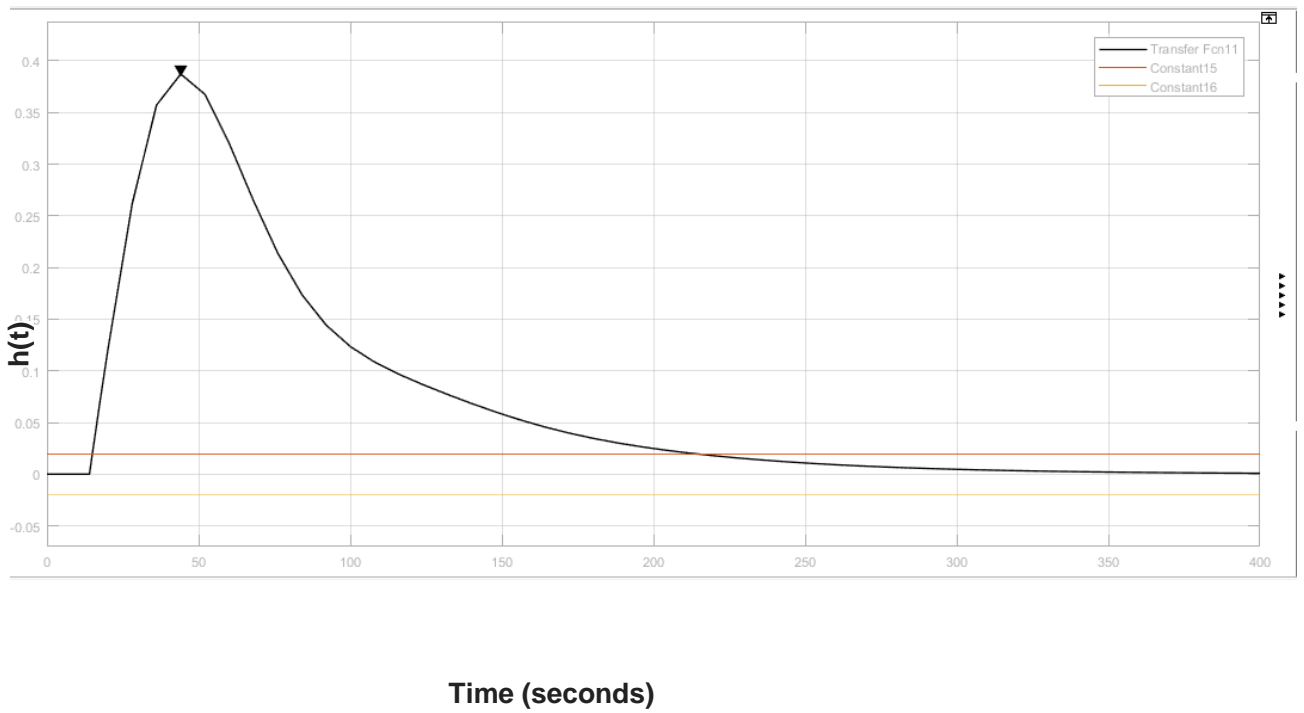


Рис. 3.23. Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.10 Прямі показники якості

Показник	«Завдання-вихід»	«Збурення-вихід»
Статична похибка $\Delta_{ст}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{дин}$	0,486	0,3872
Час регулювання $t_{рег}$, с	134	215
Ступінь затухання ψ	1	1
Перерегулювання σ , %	48,6	0

3.6.4 Порівняння методів

На рис. 3.24 вказано перехідні процеси по каналу «завдання-вихід» розрахованими інженерним (позн. 3), РАФХ (позн. 1) та МАЧХ (позн. 2) методами. На рис. 3.25 вказано перехідні процеси по каналу «збурення-вихід» розрахованими інженерним (позн. 3), РАФХ (позн. 1) та МАЧХ (позн. 2). В табл. 3.11. виконане порівняння прямих показників якості перехідних процесів за каналами та методами розрахунку параметрів регулятора.

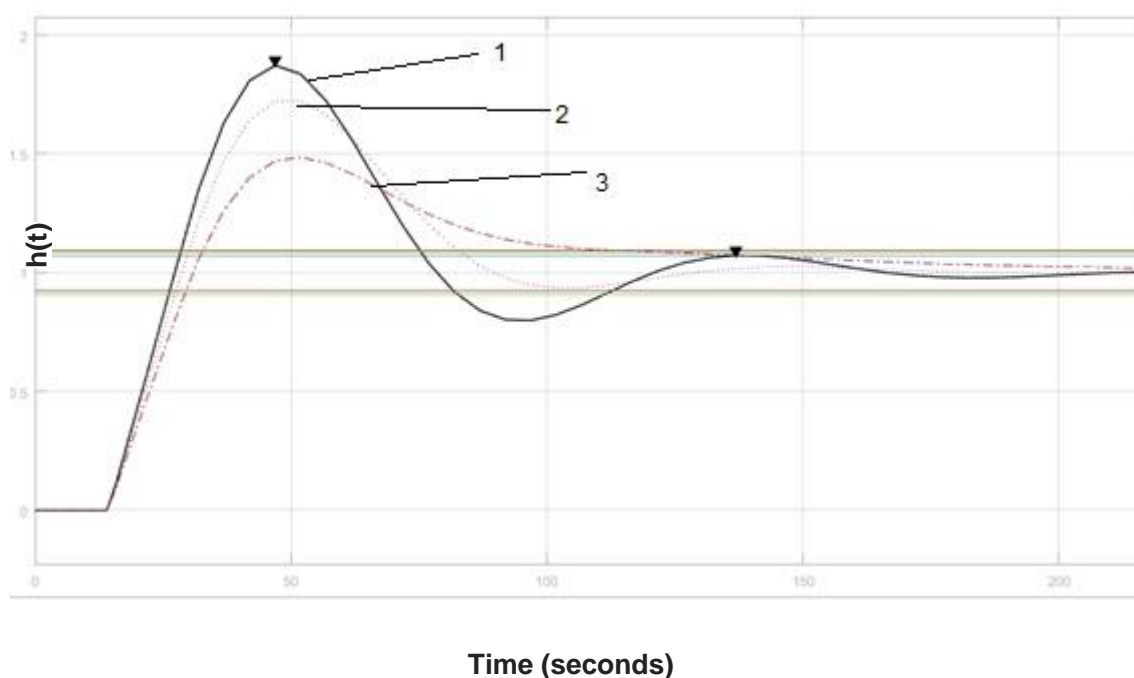


Рис. 3.24. Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

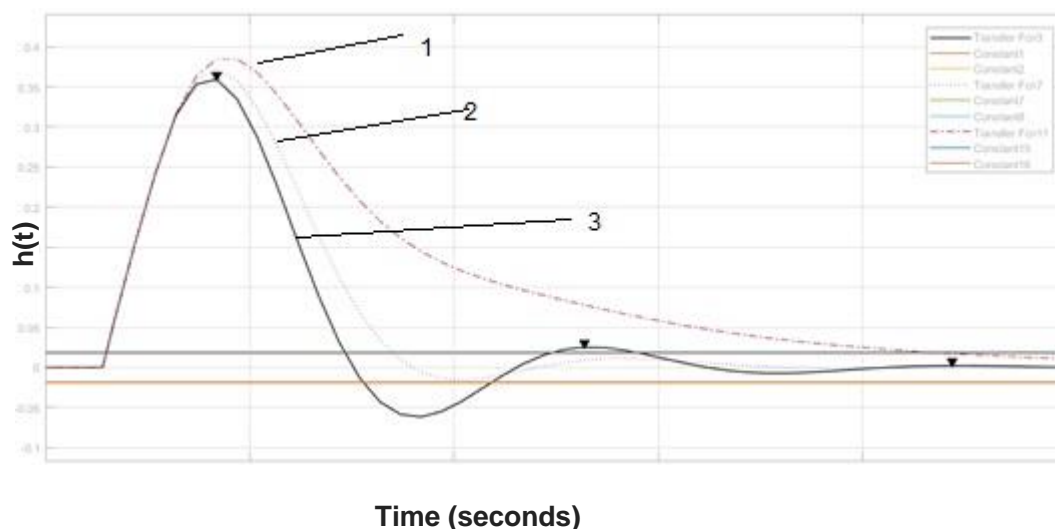


Рис. 3.25. Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.11. Порівняння прямих показників якості

Показник	«Завдання-вихід»			«Збурення-вихід»		
	РАФХ	МАЧХ	Інж. метод	РАФХ	МАЧХ	Інж. метод
Статична похибка $\Delta_{ст}$	0	0	0	0	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{дин}$	0,866	0,728	0,486	0,3604	0,3696	0,3872
Час регулювання $t_{рег}$, с	110,9	82,8	134	145,2	85,1	215
Ступінь затухання ψ	0,42	0,407	1	0,929	0,9699	1
Перерегулювання σ , %	86,6	72,8	48,6	7,01	3,008	0

З рис. 3.24 та 3.25 та прямих показників якості видно, що інженерний метод розрахунку Chien et. Al (1952) – servo виявився найкращим по каналу «Завдання – вихід» з точки зору найменшого значення динамічної похибки,

перегулювання та найвищим ступенем затухання, проте найгіршим часом регулювання. По каналу «Збурення – вихід» найкращого методу не виявлено. Кожен метод кращий по різним параметрам. Метод МАЧХ має найкращий час регулювання, метод РАФХ найменшу динамічну похибку, а інженерний метод розрахунку Chien et. Al (1952) – servo найвищий степінь затухання та найменше перерегулювання.

3.6.5 Дослідження системи автоматичного керування на грубість

Для оцінки ступеня впливу розкиду і зміни параметрів системи використовують поняття – чутливість системи. Чутливість – це властивість системи змінювати свої вихідні змінні і показники якості при відхиленні того або іншого її параметра від початкового або розрахункового значення. Для позначення протилежної властивості використовується поняття «грубість» і системи, що зберігають свої властивості при будь-яких параметричних збуреннях, називаються грубими або робастними.

Для дослідження системи при оптимальних параметрах налаштування регулятора побудуємо 3 перехідних характеристики при змінному $K_{об}$, 3 перехідних характеристики при змінному $T_{об}$ та 3 перехідних характеристики при змінному $\tau_{об}$. Варіації параметра проведемо в діапазоні 10% по каналу "завдання-вихід". На рис. 3.26 зображено перехідні процеси з варіацією $K_{об}$ (1 - $K_{об} = 1,125 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{PO}}$, 2 - $K_{об} = 1,25 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{PO}}$, 3 - $K_{об} = 1,375 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{PO}}$) при сталих значеннях $T_{об} = 60 \text{ с}$, $\tau_{об} = 14 \text{ с}$.

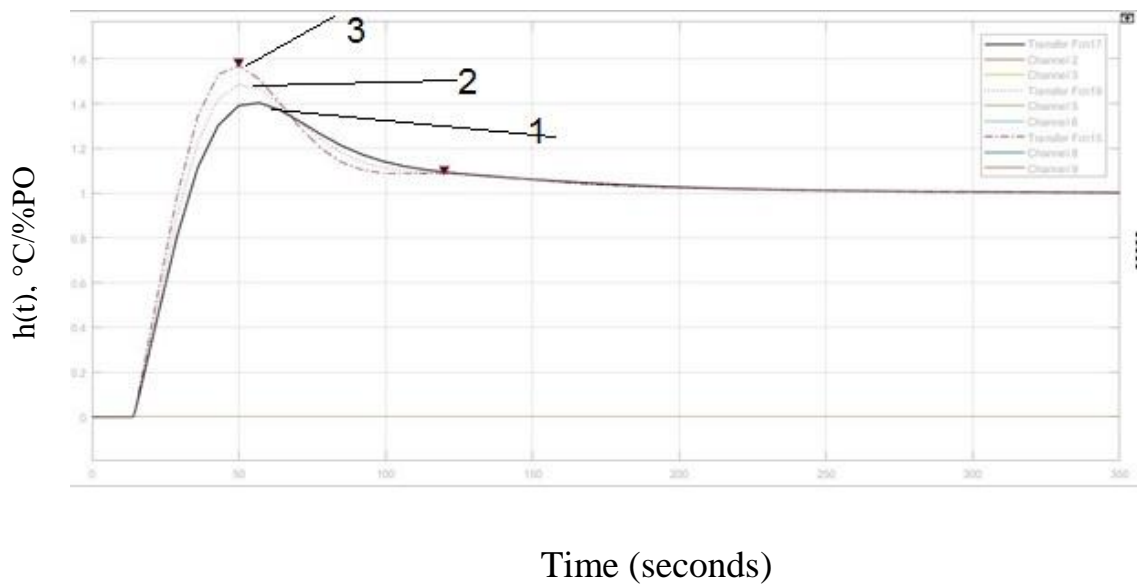


Рис. 3.26. Перехідні процеси у замкненій системі при варіації $K_{об}$

У таблиці 3.12 показано варіацію $K_{об}$ і відповідні значення часу перехідного процесу, максимального динамічного відхилення, статичної помилки, перерегулювання та ступеню затухання.

Таблиця 3.12 Варіація коефіцієнту передачі

$K_{об}$	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{дин}$	$t_{рег}, c$	ψ	$\sigma, \%$
1,125	0	0,403	214	1	40,3
1,25	0	0,486	205	1	48,6
1,375	0	0.569	190	0,845	56,9

За отриманими даними були побудовані функції чутливості для параметрів σ (рис. 3.27) та $t_{рег}$ (рис. 3.28).

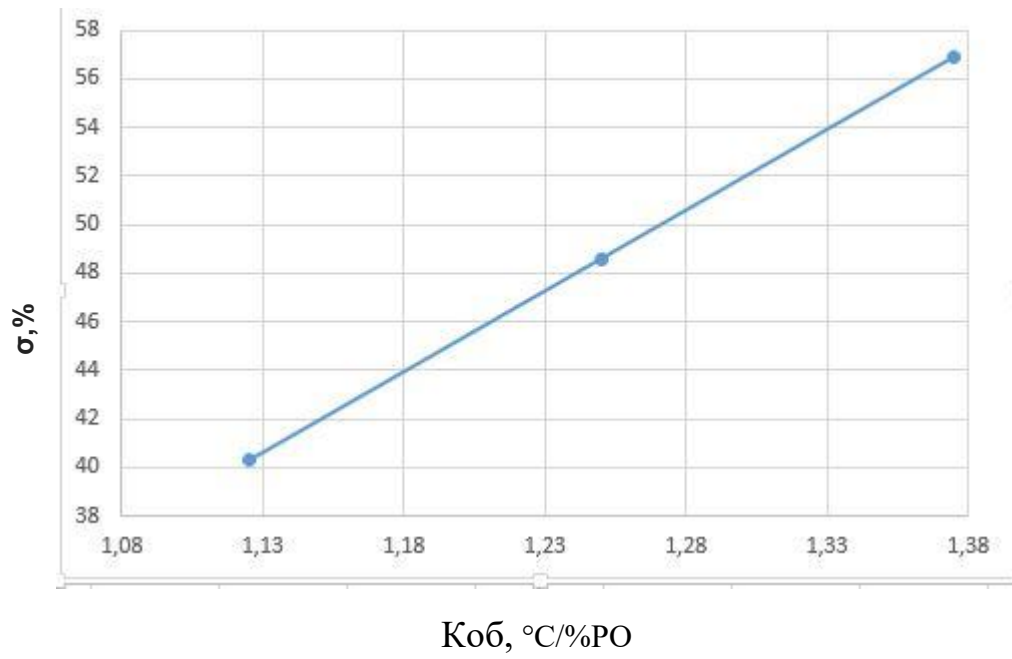


Рис. 3.27. Функція чутливості для перерегулювання при варіації $K_{об}$

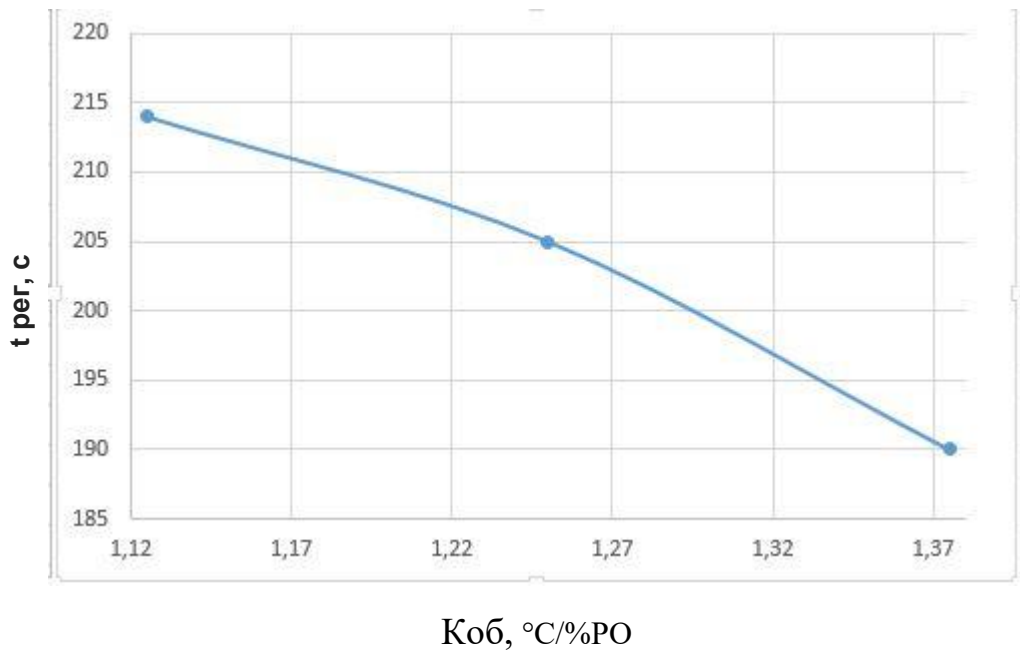


Рис. 3.28 Функція чутливості для часу перехідного процесу при варіації $K_{об}$

Розрахуємо відносні коефіцієнти чутливості за наступною формулою:

$$k_z = \frac{\left| \frac{R - R^{opt}}{R^{opt}} \right|}{\left| \frac{Z - Z^{opt}}{Z^{opt}} \right|} \quad (3.8)$$

де k_z – відносний коефіцієнт чутливості для змінного параметра Z ;

Z – поточне значення параметра;

Z^{opt} – оптимальне значення параметра;

R, R^{opt} – відповідно поточне значення критерію якості та значення при оптимальних параметрах.

$$k_{K_{t_{\text{пер}}1}} = \frac{\left| \frac{t_{\text{пер}} - t_{\text{пер}}^{opt}}{t_{\text{пер}}^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{214 - 205}{205} \right|}{\left| \frac{1,125 - 1,25}{1,25} \right|} = 0,44$$

$$k_{K_{t_{\text{пер}}2}} = \frac{\left| \frac{t_{\text{пер}} - t_{\text{пер}}^{opt}}{t_{\text{пер}}^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{190 - 205}{205} \right|}{\left| \frac{1,375 - 1,25}{1,25} \right|} = 7,31$$

$$k_{K_{\Delta_{\text{дин}}1}} = \frac{\left| \frac{\Delta_{\text{дин}} - \Delta_{\text{дин}}^{opt}}{\Delta_{\text{дин}}^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,403 - 0,486}{0,486} \right|}{\left| \frac{1,125 - 1,25}{1,25} \right|} = 1,7$$

$$k_{K_{\Delta_{\text{дин}}2}} = \frac{\left| \frac{\Delta_{\text{дин}} - \Delta_{\text{дин}}^{opt}}{\Delta_{\text{дин}}^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,569 - 0,486}{0,486} \right|}{\left| \frac{1,375 - 1,25}{1,25} \right|} = 1,7$$

$$k_{K_{\sigma1}} = \frac{\left| \frac{\sigma - \sigma^{opt}}{\sigma^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{40,3 - 48,6}{48,6} \right|}{\left| \frac{1,125 - 1,25}{1,25} \right|} = 1,7$$

$$k_{K_{\sigma2}} = \frac{\left| \frac{\sigma - \sigma^{opt}}{\sigma^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{56,9 - 48,6}{48,6} \right|}{\left| \frac{1,375 - 1,25}{1,25} \right|} = 1,7$$

$$k_{K\psi 1} = \frac{\left| \frac{\psi - \psi^{opt}}{\psi^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{1 - 1}{1} \right|}{\left| \frac{1,125 - 1,25}{1,25} \right|} = 0$$

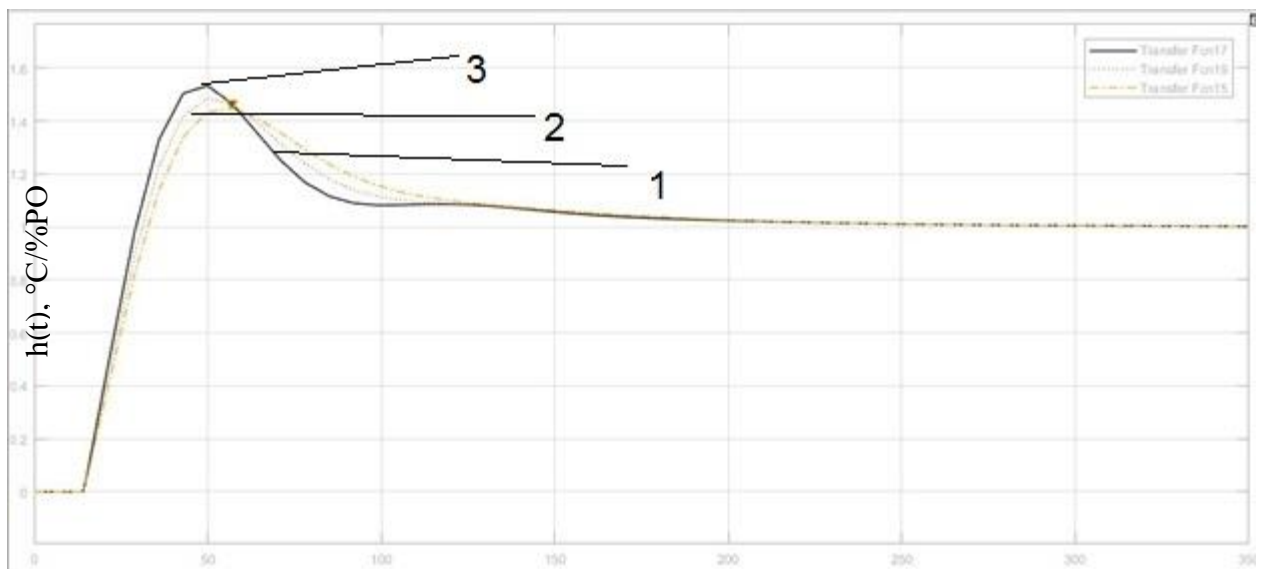
$$k_{K\psi 2} = \frac{\left| \frac{\psi - \psi^{opt}}{\psi^{opt}} \right|}{\left| \frac{K - K^{opt}}{K^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,845 - 1}{1} \right|}{\left| \frac{1,375 - 1,25}{1,25} \right|} = 1,5$$

$$k_{K_{\Delta CT} 1} = 0$$

$$k_{K_{\Delta CT} 2} = 0$$

На рис. 3.29 зображено перехідні процеси з варіацією $T_{об}$ (1 - $T_{об} = 54$ с, 2 - $T_{об} = 60$ с, 3 - $T_{об} = 66$ с) при сталих значеннях $K_{об} = 1,25 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{PO}}$, $\tau_{об} = 14$ с. У таблиці 3.13 показано варіацію $K_{об}$ і відповідні значення часу перехідного процесу, максимального динамічного відхилення, статичної помилки, перерегулювання та ступеню затухання.

За отриманими даними були побудовані функції чутливості для параметрів σ (рис. 3.30) та $t_{пер}$ (рис. 3.31).



Time (seconds)

Рис. 3.29. Перехідні процеси у замкненій системі при варіації $T_{об}$

Таблиця 3.13. Варіація сталої часу

$T_{об}$	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{дин}$	$t_{рег}, c$	ψ	$\sigma, \%$
54	0	0,533	192	0,83	53,3
60	0	0,486	205	1	48,6
66	0	0,448	210	1	44,8

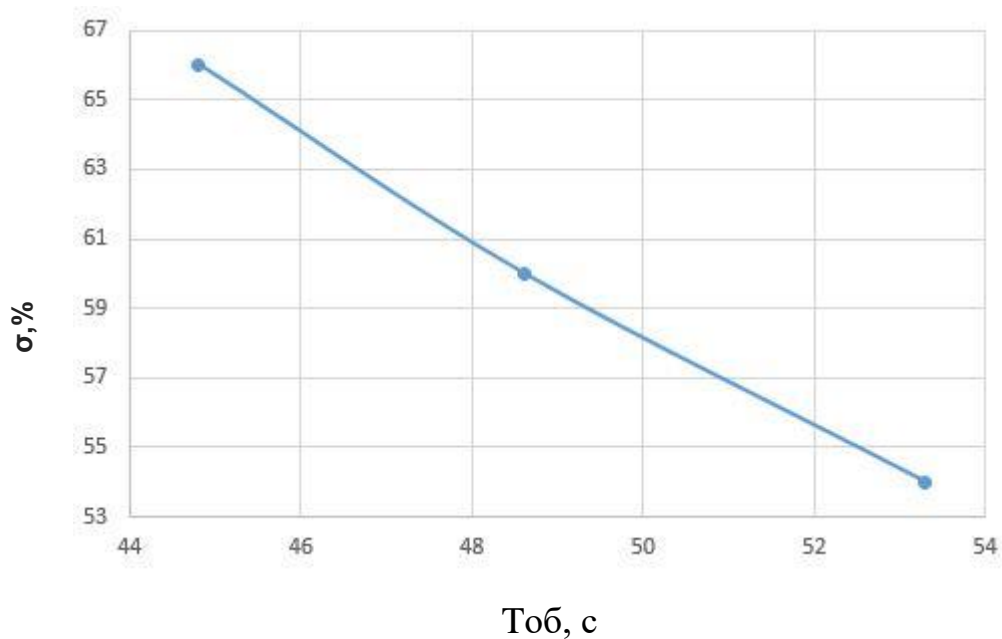


Рис. 3.30 Функція чутливості для перерегулювання при варіації $T_{об}$

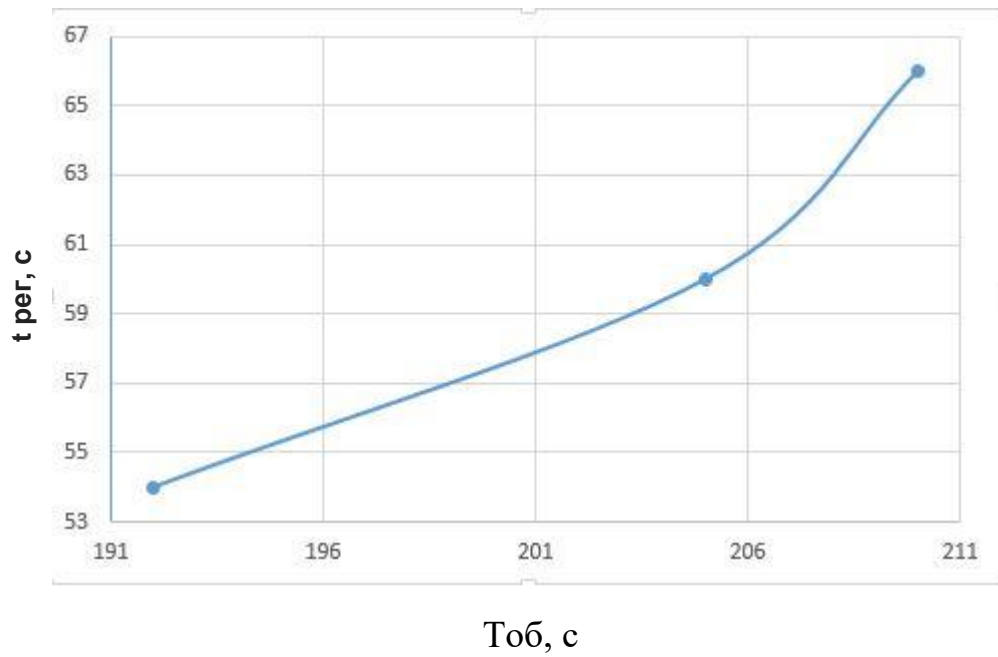


Рис. 3.31. Функція чутливості для часу перехідного процесу при варіації $T_{\text{об}}$

Розрахуємо відносні коефіцієнти чутливості за формулою (3.8.):

$$k_{T_{t_{\text{пер}}1}} = \frac{\left| \frac{t_{\text{пер}} - t_{\text{пер}}^{\text{opt}}}{t_{\text{пер}}^{\text{opt}}} \right|}{\left| \frac{T - T^{\text{opt}}}{T^{\text{opt}}} \right|} = \frac{\left| \frac{192 - 205}{205} \right|}{\left| \frac{54 - 60}{60} \right|} = 0,634$$

$$k_{T_{t_{\text{пер}}2}} = \frac{\left| \frac{t_{\text{пер}} - t_{\text{пер}}^{\text{opt}}}{t_{\text{пер}}^{\text{opt}}} \right|}{\left| \frac{T - T^{\text{opt}}}{T^{\text{opt}}} \right|} = \frac{\left| \frac{210 - 205}{205} \right|}{\left| \frac{66 - 60}{60} \right|} = 0,243$$

$$k_{T_{\Delta_{\text{дин}}1}} = \frac{\left| \frac{\Delta_{\text{дин}} - \Delta_{\text{дин}}^{\text{opt}}}{\Delta_{\text{дин}}^{\text{opt}}} \right|}{\left| \frac{T - T^{\text{opt}}}{T^{\text{opt}}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,533 - 0,486}{0,486} \right|}{\left| \frac{54 - 60}{60} \right|} = 0,967$$

$$k_{T_{\Delta_{\text{дин}}2}} = \frac{\left| \frac{\Delta_{\text{дин}} - \Delta_{\text{дин}}^{\text{opt}}}{\Delta_{\text{дин}}^{\text{opt}}} \right|}{\left| \frac{T - T^{\text{opt}}}{T^{\text{opt}}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,448 - 0,486}{0,486} \right|}{\left| \frac{66 - 60}{60} \right|} = 0,78$$

$$k_{T_{\sigma}1} = \frac{\left| \frac{\sigma - \sigma^{opt}}{\sigma^{opt}} \right|}{\left| \frac{T - T^{opt}}{T^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{53,3 - 48,6}{48,6} \right|}{\left| \frac{54 - 60}{60} \right|} = 0,967$$

$$k_{T_{\sigma}2} = \frac{\left| \frac{\sigma - \sigma^{opt}}{\sigma^{opt}} \right|}{\left| \frac{T - T^{opt}}{T^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{44,8 - 48,6}{48,6} \right|}{\left| \frac{66 - 60}{60} \right|} = 0,78$$

$$k_{T_{\psi}1} = \frac{\left| \frac{\psi - \psi^{opt}}{\psi^{opt}} \right|}{\left| \frac{T - T^{opt}}{T^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,83 - 1}{1} \right|}{\left| \frac{54 - 60}{60} \right|} = 1,7$$

$$k_{T_{\psi}2} = \frac{\left| \frac{\psi - \psi^{opt}}{\psi^{opt}} \right|}{\left| \frac{T - T^{opt}}{T^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{1 - 1}{1} \right|}{\left| \frac{66 - 60}{60} \right|} = 0$$

$$k_{T_{\Delta_{ст}1}} = 0$$

$$k_{T_{\Delta_{ст}2}} = 0$$

На рис. 3.32 зображено перехідні процеси з варіацією $\tau_{об}$ (1 - $\tau_{об} = 13,3$ с, 2 - $\tau_{об} = 14$ с, 3 - $\tau_{об} = 14,7$ с) при сталих значеннях $K_{об} = 1,25 \frac{^{\circ}\text{C}}{\% \text{PO}}$, $T_{об} = 60$ с. У таблиці 3.14 показано варіацію $\tau_{об}$ і відповідні значення часу перехідного процесу, максимального динамічного відхилення, статичної помилки, перерегулювання та ступеню затухання.

За отриманими даними). и були побудовані функції чутливості для параметрів σ (рис. 3.33) та $t_{пер}$ (рис. 3.34)

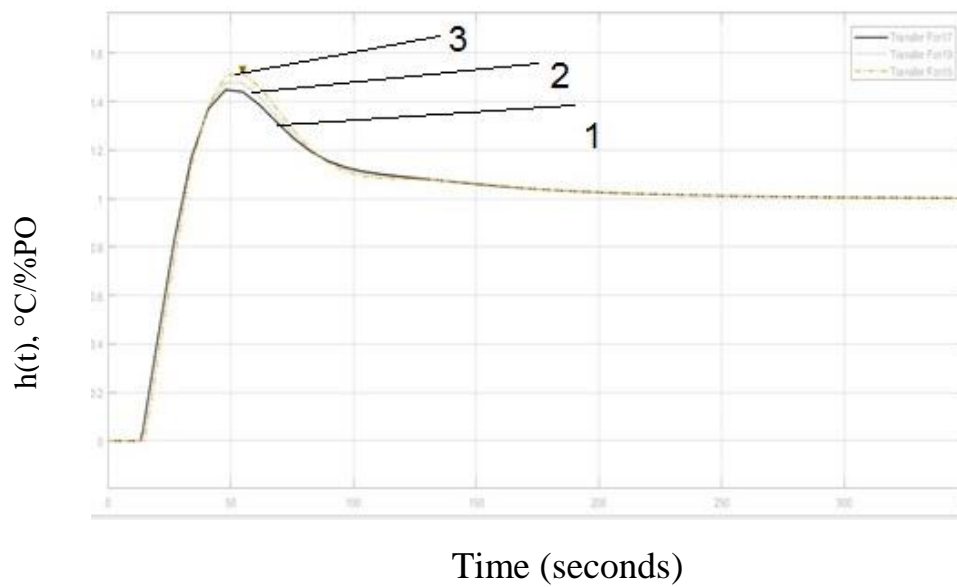


Рис. 3.32. Перехідні процеси у замкненій системі при варіації $\tau_{об}$

Таблиця 3.14. Варіація транспортного запізнення

$\tau_{об}$	$\Delta_{ст}$	$\Delta_{дин}$	$t_{рег}, c$	ψ	$\sigma, \%$
13,3	0	0,448	200	1	44,8
14	0	0,486	205	1	48,6
14,7	0	0,517	208	1	51,7

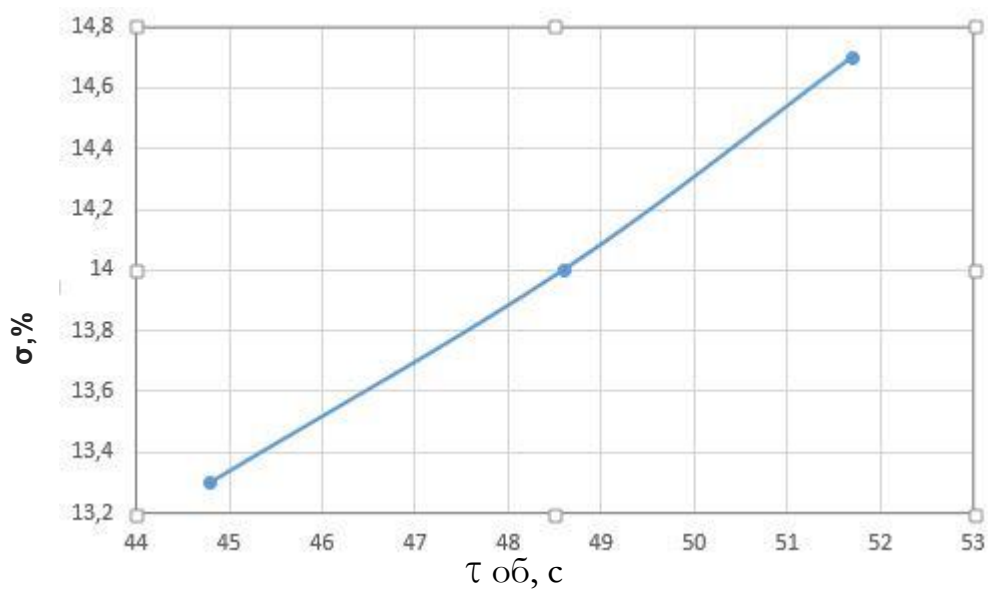


Рис. 3.33. Функція чутливості для перерегулювання при варіації $\tau_{об}$

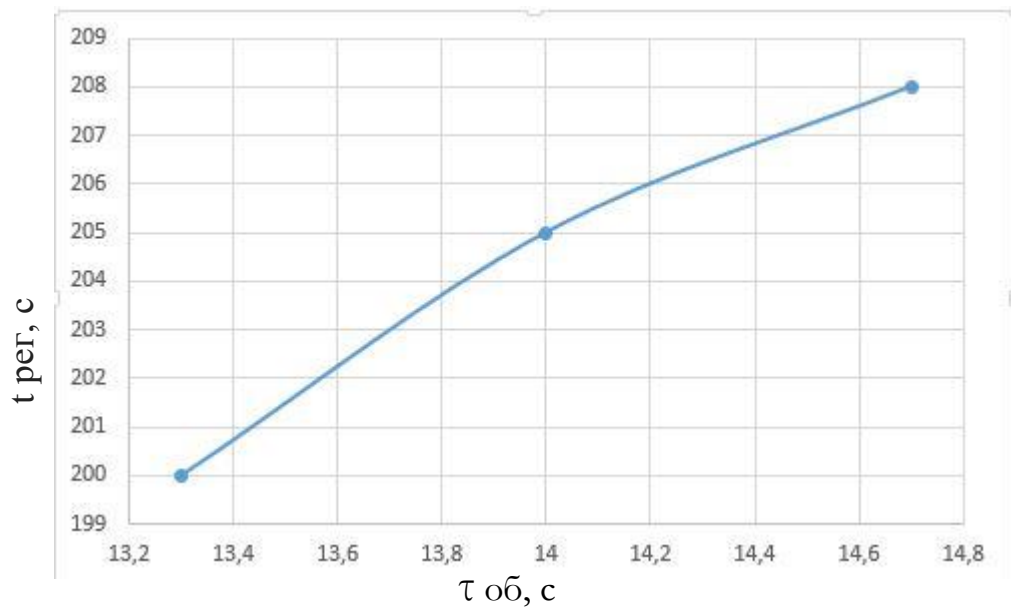


Рис. 3.34. Функція чутливості для часу перехідного процесу при варіації $\tau_{об}$

Розрахуємо відносні коефіцієнти чутливості за формулою (3.8.):

$$k_{\tau_{t_{пер}1}} = \frac{\left| \frac{t_{пер} - t_{пер}^{opt}}{t_{пер}^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{200 - 205}{205} \right|}{\left| \frac{13,3 - 14}{14} \right|} = 0,24$$

$$k_{\tau_{t_{пер}2}} = \frac{\left| \frac{t_{пер} - t_{пер}^{opt}}{t_{пер}^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{208 - 205}{205} \right|}{\left| \frac{14,7 - 14}{14} \right|} = 0,24$$

$$k_{\tau_{\Delta_{дин}1}} = \frac{\left| \frac{\Delta_{дин} - \Delta_{дин}^{opt}}{\Delta_{дин}^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,448 - 0,486}{0,486} \right|}{\left| \frac{13,7 - 14}{14} \right|} = 0,78$$

$$k_{\tau_{\Delta_{дин}2}} = \frac{\left| \frac{\Delta_{дин} - \Delta_{дин}^{opt}}{\Delta_{дин}^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{0,517 - 0,486}{0,486} \right|}{\left| \frac{14,7 - 14}{14} \right|} = 0,63$$

$$k_{\tau_{\sigma}1} = \frac{\left| \frac{\sigma - \sigma^{opt}}{\sigma^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{44,8 - 48,6}{48,6} \right|}{\left| \frac{13,7 - 14}{14} \right|} = 0,78$$

$$k_{\tau_{\sigma}2} = \frac{\left| \frac{\sigma - \sigma^{opt}}{\sigma^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{51,7 - 48,6}{48,6} \right|}{\left| \frac{14,7 - 14}{14} \right|} = 0,637$$

$$k_{\tau_{\psi}1} = \frac{\left| \frac{\psi - \psi^{opt}}{\psi^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{1 - 1}{1} \right|}{\left| \frac{13,3 - 14}{14} \right|} = 0$$

$$k_{\tau_{\psi}2} = \frac{\left| \frac{\psi - \psi^{opt}}{\psi^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{1 - 1}{1} \right|}{\left| \frac{14,7 - 14}{14} \right|} = 0$$

$$k_{\tau_{\Delta_{CT}}1} = 0$$

$$k_{\tau_{\Delta_{CT}}2} = 0$$

Аналізуючи отримані результати дослідження впливу зміни параметрів системи на прямі критерії якості, можна відмітити, що дана АСК не є грубою, так як для грубої САР значення коефіцієнтів чутливості не повинні перевищувати 0,1.

В розділі було розраховано вимірювальні канали і здійснено розрахунок надійності реалізації функцій автоматичної системи регулювання. Результати показали, що вимірювальні канали і надійність реалізації функцій відповідають вимогам до системи.

Також було здійснено розрахунок параметрів регулятора інженерним методом і методами МАЧХ та РАФХ.

3.7 Побудова моделі САК для контуру регулювання тиску в топці колодязя

$$W_{T3}(s) = e^{-\tau_{06}s} \quad (3.9)$$

$$W_{АП}(s) = \frac{K_{06}}{T_{06}s+1} \quad (3.10)$$

$$W_{06}(s) = W_{АП}(s) \cdot W_{T3}(s) = \frac{K_{06}}{T_{06}s+1} \cdot e^{-\tau_{06}s} \quad (3.11)$$

Користуючись довідковими матеріалами динамічні характеристики об'єкта приймем такими:

1. Коефіцієнт передачі: $K_{06} = 0,44 \frac{^{\circ}\text{C}}{\%PO}$
2. Постійна часу $T_{06} = 12 \text{ с}$
3. Транспортне запізнення $\tau_{06} = 4,5 \text{ с}$

Тоді передаточна функція об'єкту:

$$W_{06}(s) = \frac{0,44}{12s+1} \cdot e^{-4,5s}$$

Промодельємо перехідну характеристику об'єкта керування за допомогою середовища комп'ютерного моделювання MatLab. Результат зображено на рис. 3.35.

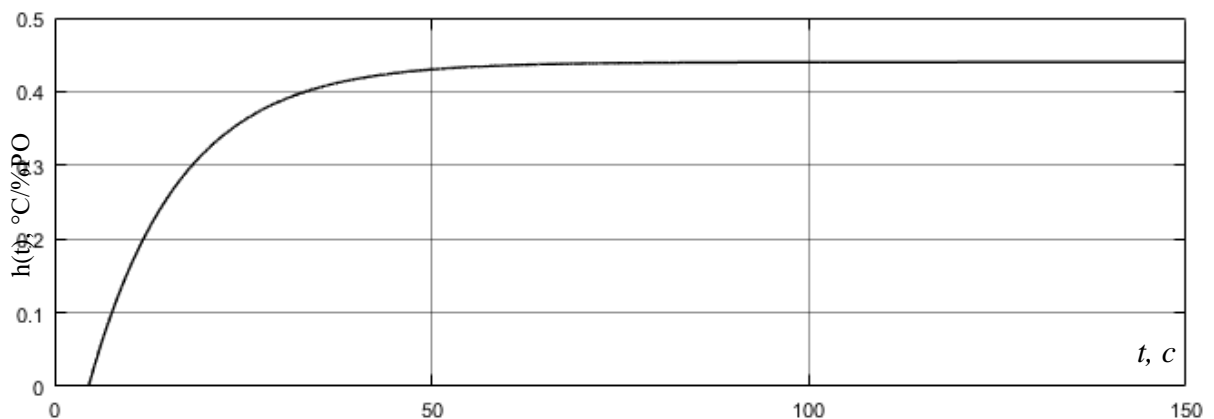


Рис. 3.35 Перехідна характеристика об'єкта керування

3.7.1 Розрахунок параметрів регулятора методом РАФХ

Для побудови РАФХ скористаємося формулами для ПІ-регулятора:

$$K_p = - \frac{P_{об}(m,w) + m Q_{об}(m,w)}{A_{об}^2(m,w)}, \quad (3.12)$$

$$K_u = -w(m^2 + 1) \frac{Q_{об}(m,w)}{A_{об}^2(m,w)}, \quad (3.13)$$

$$\text{де } K_u = \frac{K_p}{T_u}, A_{об}(m, w) = \sqrt{P_{об}^2(m, w) + Q_{об}^2(m, w)}.$$

Виберемо перехідний процес, якому відповідає $\psi=0,99 \Rightarrow m = \frac{\ln(1-\psi)}{-2\pi} = 0,733$.

Побудуємо АФХ і РАФХ для об'єкта управління за допомогою наступного коду в середовищі MatLab. Результат представлено на рис. 3.36.

```
w=0:0.0001:1.1;  
p=j*w;  
W=(0.44.*exp(-4.5.*p))./(12.*p+1);  
Re=real(W);  
Im=imag(W);  
plot(Re,Im);  
hold on  
grid on  
m=0.733;
```

```

p=w*(j-m);
W1=(0.44.*exp(-4.5.*p))./(12.*p+1);
Re1=real(W1);
Im1=imag(W1);
plot(Re1,Im1);
xlabel('Re(w)');
ylabel('Im(w)');

```

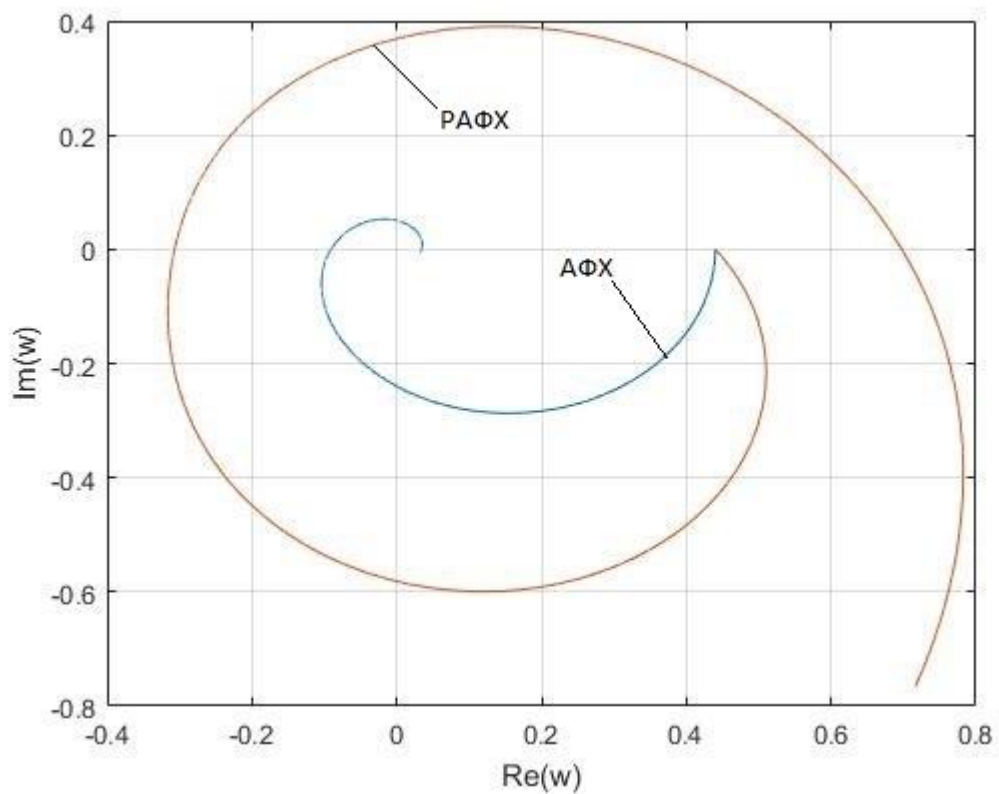


Рис. 3.36 АФХ і РАФХ об'єкта управління

Побудуємо криву заданої степені коливальності за допомогою формул (3.12) та (3.13) для ПІ-регулятора, яка представлена на рис. 3.37.

```
m=0.733;
```

```

w=0:0.0001:0.33;
W=(0.44.*exp(-4.5*(-m*w+i*w)))./(12*(-m*w+i*w)+1);
Re=real(W);
Im=imag(W);
Kp=-(m*Im+Re)./(Im.^2+Re.^2);
Ki=-w*(m.^2+1).*Im./(Im.^2+Re.^2);
plot(Kp,Ki,'-k');
ylabel('Ku');
xlabel('Kp');
grid on;
hold on;
plot(3.4592, 0.3682, 'ko');

```

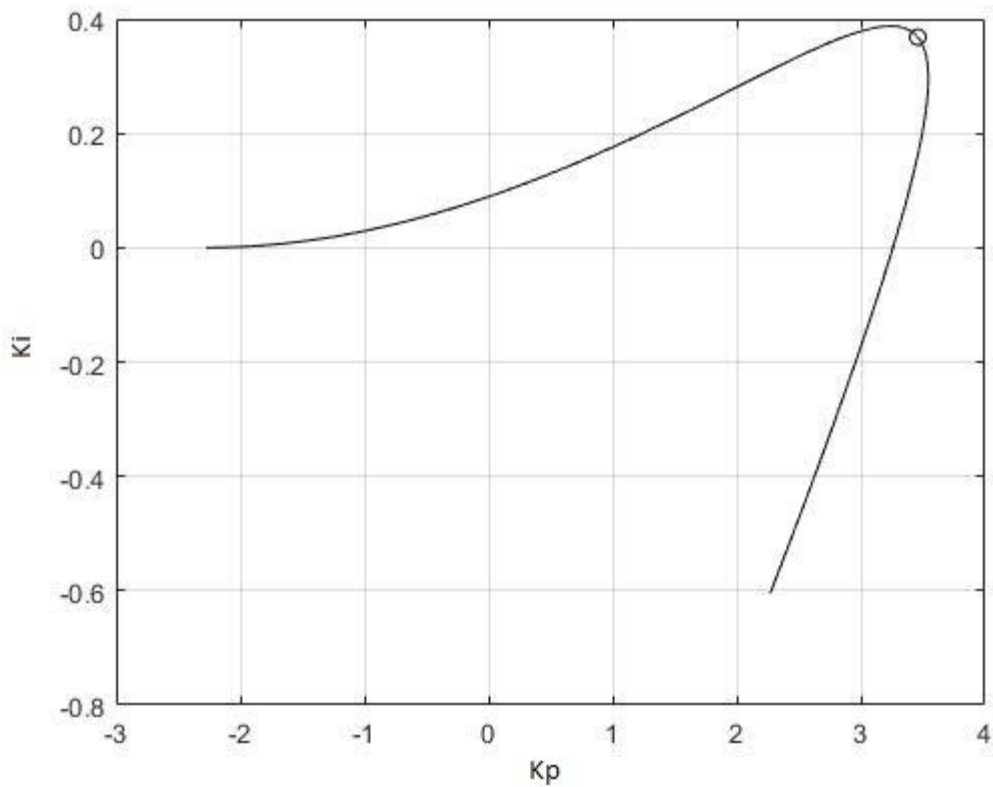


Рис. 3.37 Крива заданого ступеня коливальності $m = 0.733$

Визначимо параметр K_i як $K_i = 0,95K_i^{max}$, для кращого значення інтегрального квадратичного критерію якості перехідного процесу системи.

Отримали такі налаштування регулятора:

$$K_p = 3.4592; K_i = 0.36822; T_i = 9.394;$$

Тепер побудуємо РАФХ розімкнутої системи з отриманими оптимальними налаштуваннями ПІ-регулятора (рис. 3.38):

```
w=0.08:0.001:1.2;
m=0.733;
s=w.*(-m+j);
Wob=(0.44.*exp(-4.5.*s))./(12.*s+1);
Wr_v=3.4592.*(1+1./(9.394.*s));
Wrs=Wr_v.*Wob;
Re=real(Wrs);
Im=imag(Wrs);
plot(Re,Im)
grid on
hold on
s=w.*j;
Wob=(0.44.*exp(-4.5.*s))./(12.*s+1);
Wr_v=3.4592.*(1+1./(9.394.*s));
Wrs=Wr_v.*Wob;
Re=real(Wrs);
Im=imag(Wrs);
plot(Re,Im)
xlabel('Re(w)')
```

ylabel('Im(w)')

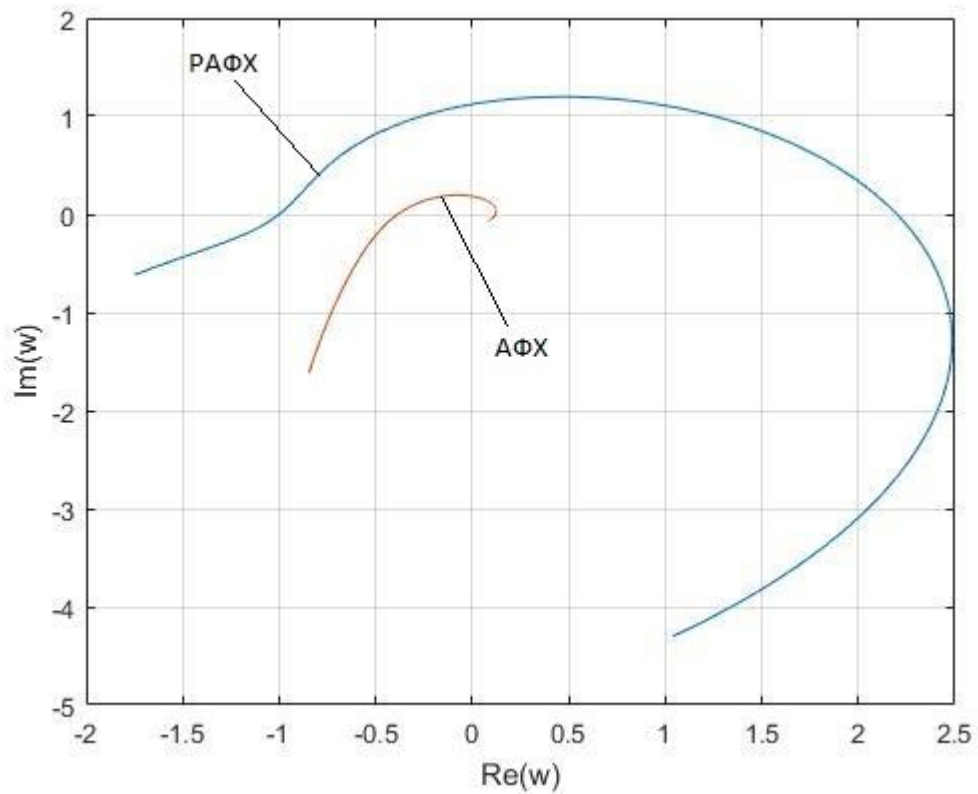


Рис. 3.38 АФХ та РАФХ розімкнутої системи

Як видно із рис. 3.38, РАФХ розімкнутої системи проходить через точку $(-1;j0)$. Це означає, що отримана система буде мати бажаний кореневий показник $m=m^*=0.733$.

Перехідні процеси для одноконтурної системи з ПІ-регулятором з параметрами розрахованими методом РАФХ зображені по каналу «завдання-вихід» на рис. 3.39 та по каналу «збурення-вихід» на рис. 3.40. Прямі показники якості представлені в табл. 3.15.

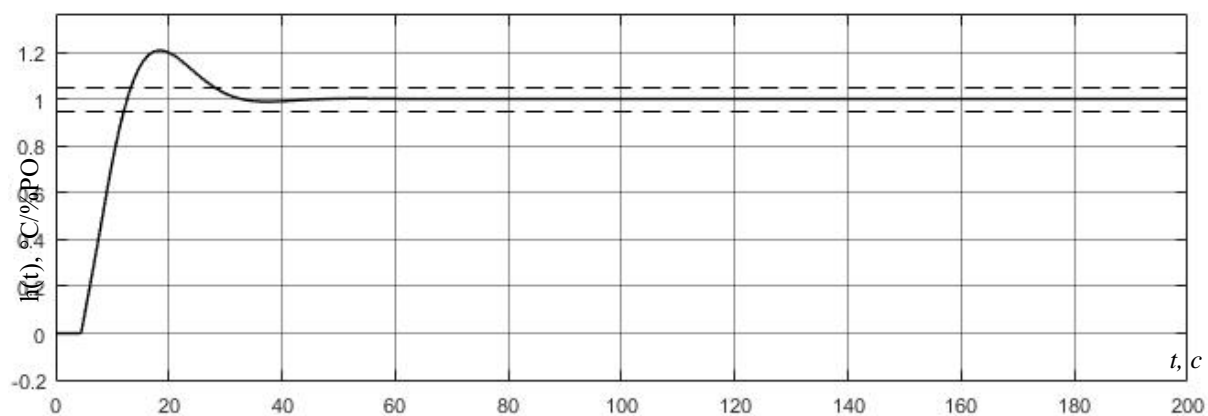


Рис. 3.39 Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

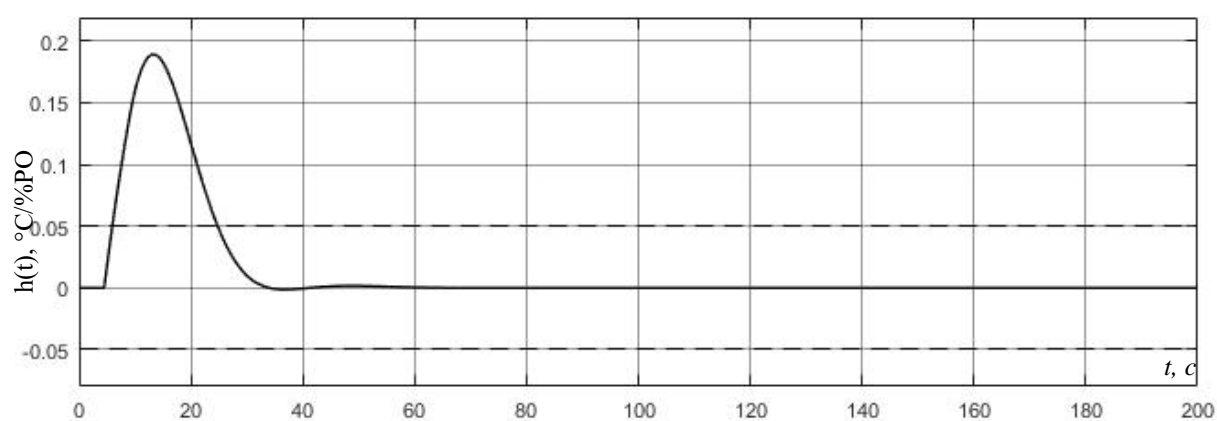


Рис. 3.40 Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.15 Прямі показники якості

Показник	«Завдання-вихід»	«Збурення-вихід»
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0,2	0,1892
Час регулювання $t_{\text{рег}}$, с	28	24,78
Ступінь затухання ψ	0,99	0,991
Перерегулювання σ , %	20,7	0

3.7.2 Розрахунок параметрів регулятора методом МАЧХ

Задасмося частотним показником коливальності $M=1.6$, побудуємо АФХ розімкненої системи при $K_p = 1$ та $T_u = \{5, 10, 15, 20, 25\}$, пряму під кутом, що дорівнює $\beta = \arcsin\left(\frac{1}{M}\right) = \arcsin\left(\frac{1}{1.6}\right) = 38,68^\circ$ та підберемо для кожного значення параметру T_u коло, центр якого лежить на від'ємній частині реальної осі і яке дотикатиметься і до годографу і до прямої. Годограф, промінь і коло для значень параметру T_u зображені на рис. 3.41, 3.42, 3.43, 3.44, 3.45 відповідно.

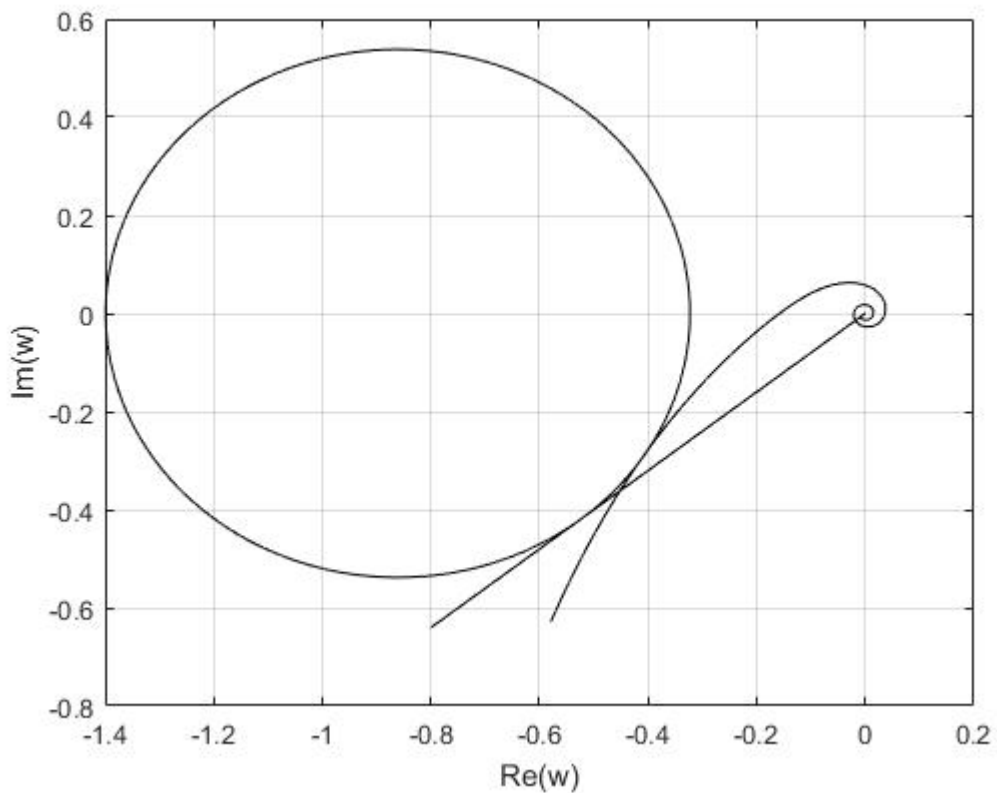


Рис. 3.41 Метод МАЧХ для ПІ-регулятора при $T_u = 5$

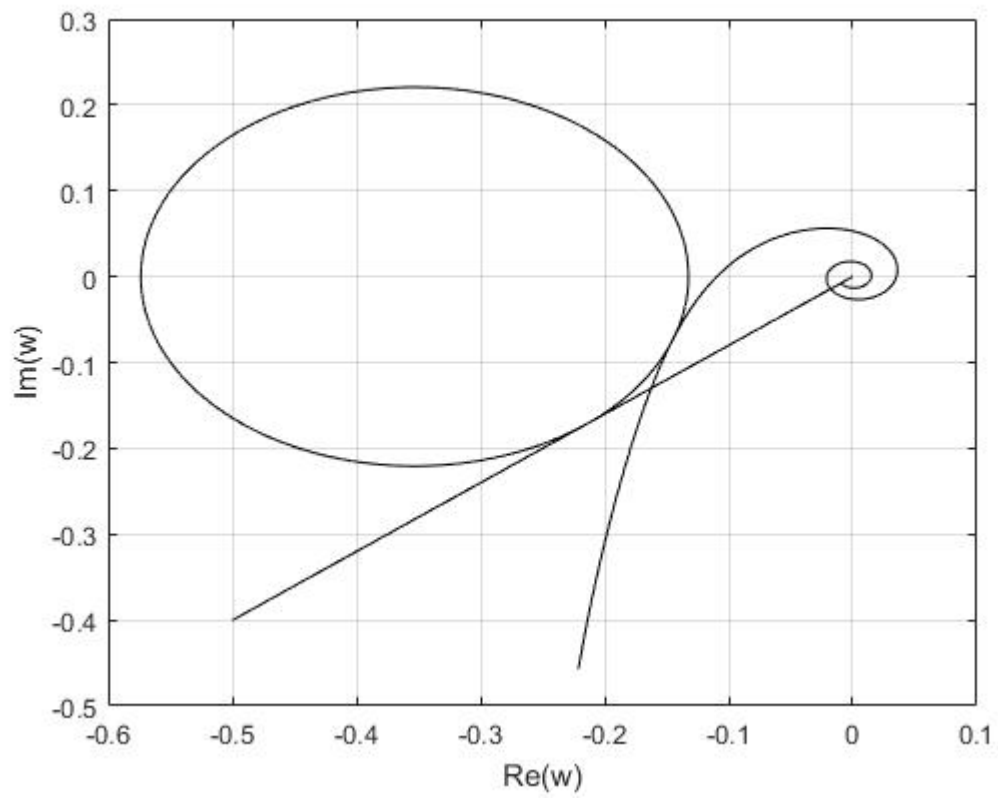


Рис. 3.42 Метод МАЧХ для ПИ-регулятора при $T_u = 10$

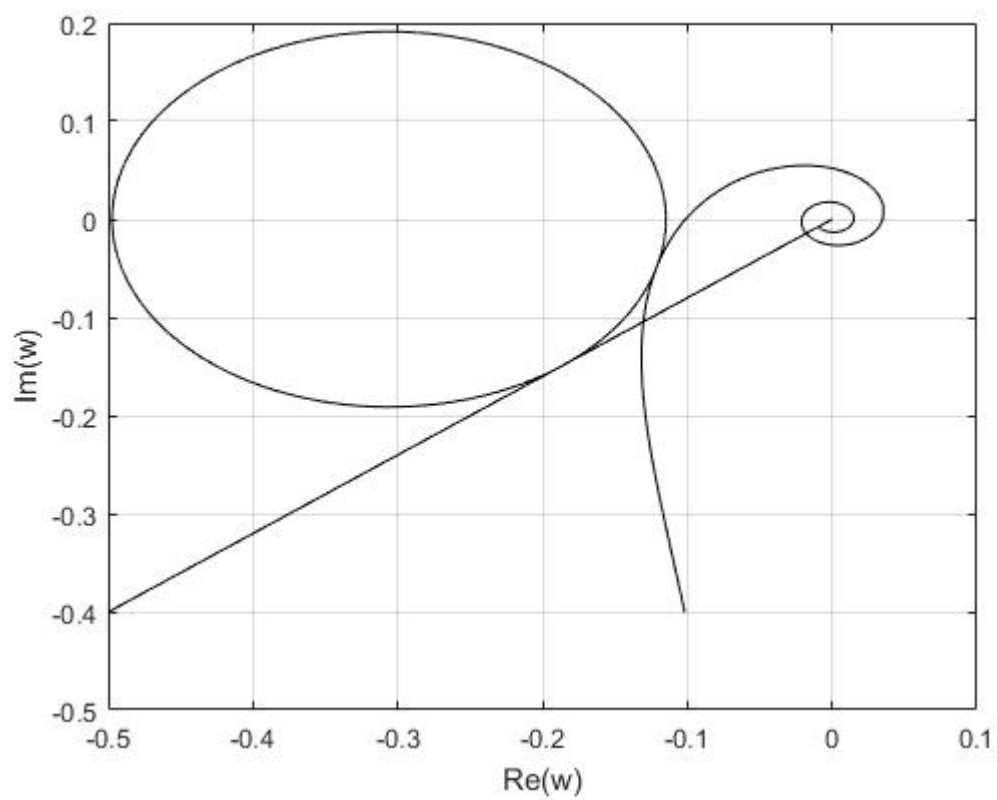


Рис. 3.43 Метод МАЧХ для ПИ-регулятора при $T_u = 15$

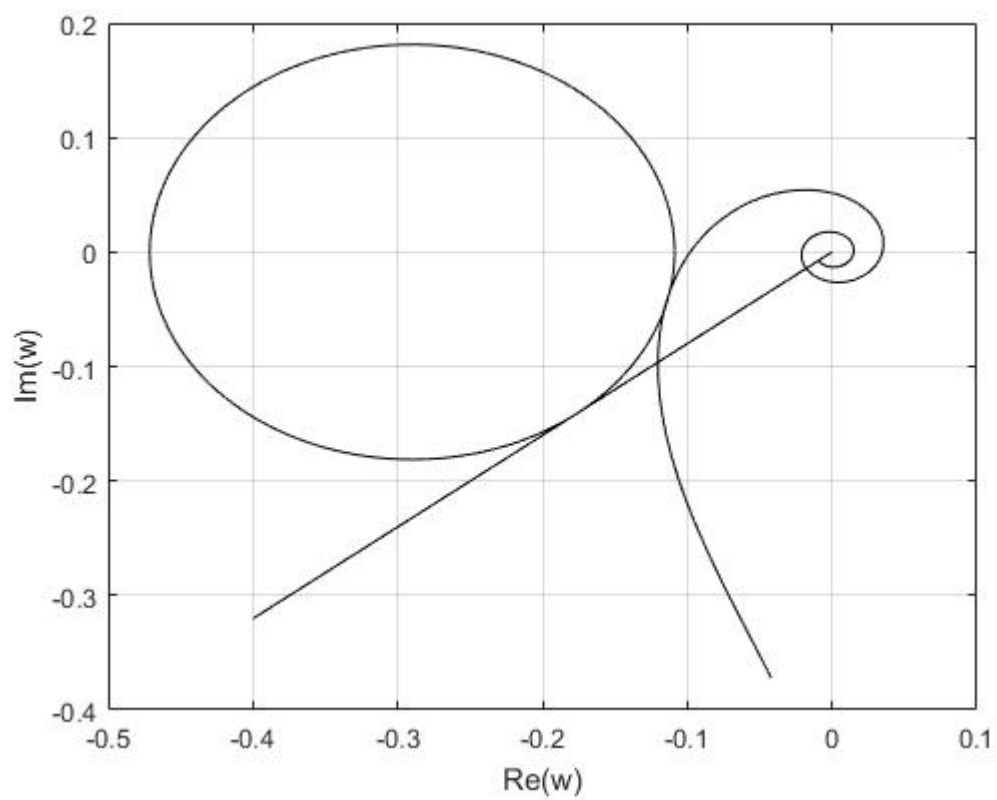


Рис. 3.44 Метод МАЧХ для ПИ-регулятора при $T_u = 20$

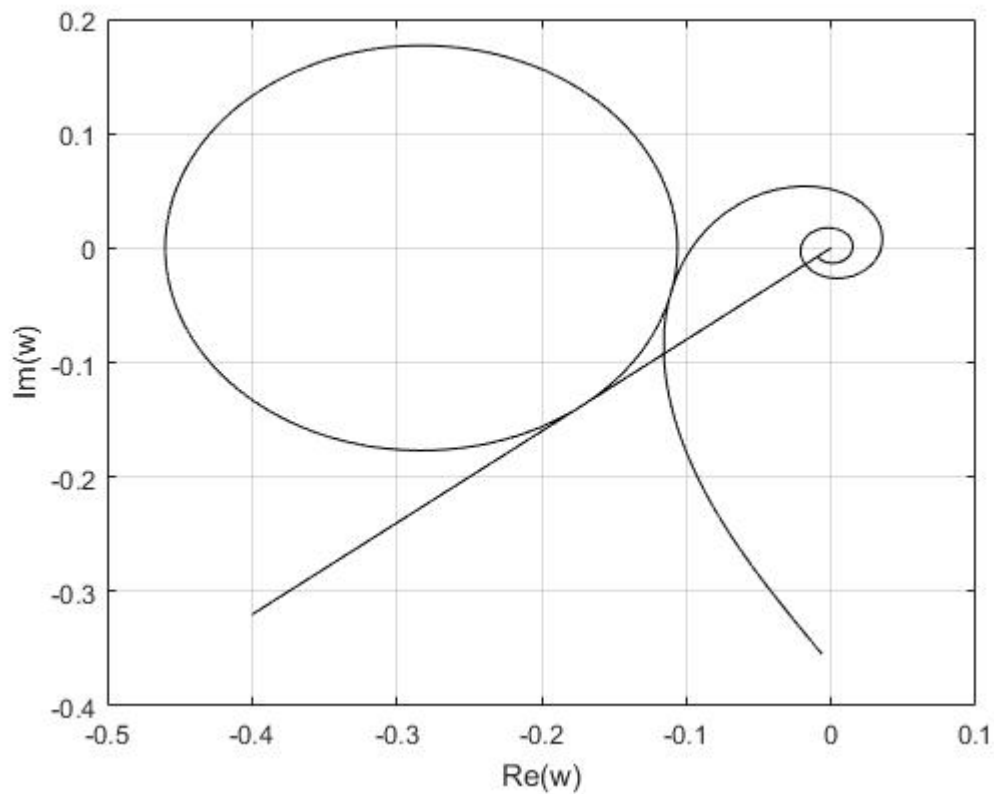


Рис. 3.45 Метод МАЧХ для ПІ-регулятора при $T_u = 25$

Розрахуємо оптимальне значення параметру K_p для кожного значення параметру T_u за формулою:

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1}, \quad (3.14)$$

де r – радіус кола; M – заданий частотний показник коливальності, $M = 1,6$.

1) При значенні $T_u = 5$:

$$r = 0,5381;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,5381} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 1,906;$$

2) При значенні $T_u = 10$:

$$r = 0,2206;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,2206} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 4,6488;$$

3) При значенні $T_u = 15$:

$$r = 0,1912;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,1912} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 5,3628;$$

4) При значенні $T_u = 20$:

$$r = 0,1819;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,1819} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 5,6393;$$

5) При значенні $T_u = 25$:

$$r = 0,1769;$$

$$K_p = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} = \frac{1}{0,1769} \cdot \frac{1,6}{1,6^2 - 1} = 5,7987;$$

Отримані дані зведемо в табл. 3.16 і побудуємо залежність $K_u = f(K_p)$,

яка представлена на рис. 3.46, де

$$K_u = \frac{K_p}{T_u}, \quad (3.15)$$

Таблиця 3.16 Перелік параметрів налаштування регулятора

K_p	K_i	T_i
1,9060	0,3812	5
4,6488	0,4649	10
5,3628	0,3575	15
5,6587	0,2829	20
5,7987	0,2319	25

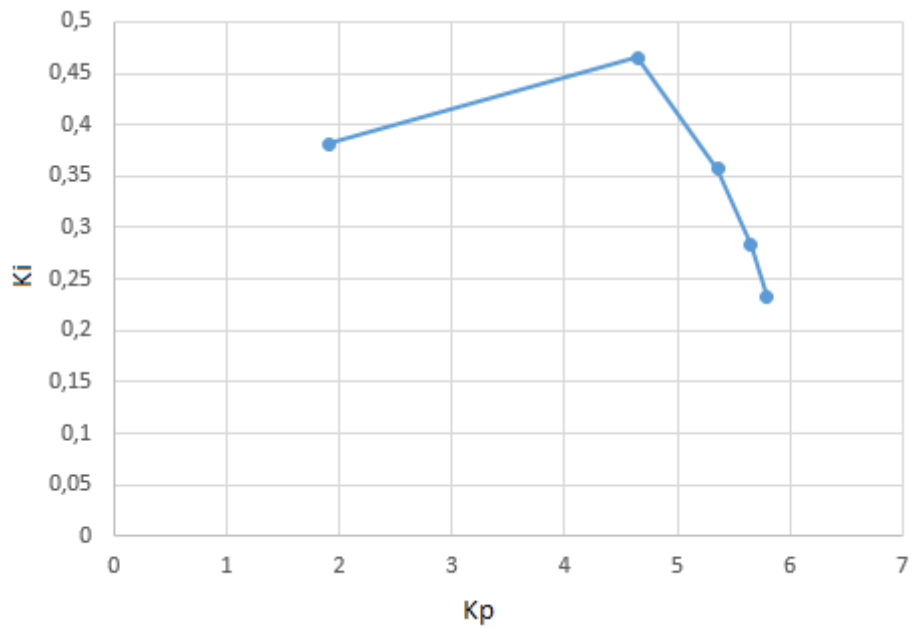


Рис. 3.46 Залежність $K_i = f(K_p)$

Знайдемо оптимальні параметри, виходячи з наведеного графіка залежності на рис. 3.46, які визначаються як максимум даної залежності, тобто $K_i = K_{max}$: $K_p = 4,6488$; $T_i = 10$; $K_i = 0.4649$;

Побудуємо АЧХ замкнутої системи (рис. 3.47) з даними оптимальними значеннями параметрів за допомогою наступного коду в середовищі MatLab.

```
w=0:0.0001:5;
p=j*w;
Tu = 10;
Kreg = 4.6488;
Wreg = Kreg.*(1+1./(Tu.*p));
Wob=(exp(-4.5*p).*0.44)./(12.*p + 1);
Wraz = Wreg.*Wob;
Wzam = Wraz./(1 + Wraz);
Re=real(Wzam);
```

```

Im=imag(Wzam);
A=(Re.^2+Im.^2).^(1/2);
plot(w,A)
xlabel('w');
ylabel('A(w)');
grid on

```

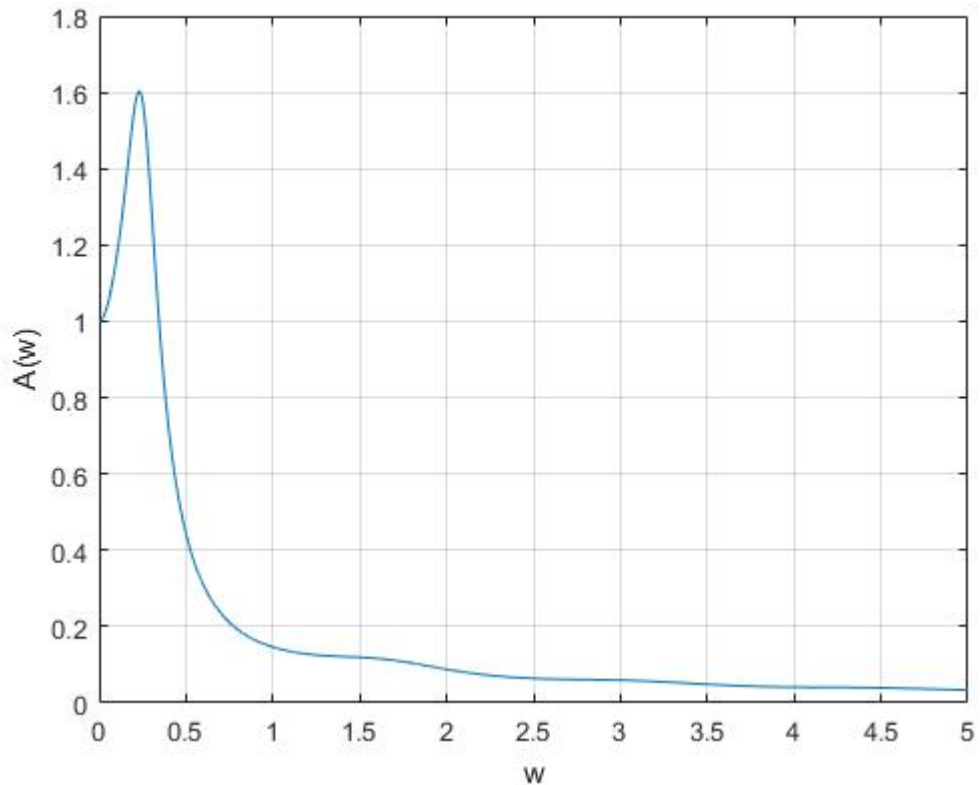


Рис. 3.47 АЧХ системи з ПІ – регулятором при розрахованих оптимальних параметрах регулятора.

Для перевірки отриманих значень параметрів регулятора розрахуємо частотний показник коливальності використовуючи АЧХ зображену на рис. 3.47 та формулу (5.15):

$$M = \frac{A_{3.c.}^{max}(\omega_p)}{A_{3.c.}(\omega_0)}, \quad (3.16)$$

де $A_{3.c.}^{max}(\omega_p)$ – максимальне значення АЧХ замкнутої системи при резонансній частоті, $A_{3.c.}^{max}(\omega_p) = 1,6$; $A_{3.c.}(\omega_0)$ – значення АЧХ замкнутої системи при частоті $\omega_0 = 0$, $A_{3.c.}(\omega_0) = 1$.

$$M = \frac{A_{3.c.}^{max}(\omega_p)}{A_{3.c.}(0)} = \frac{1,6}{1} = 1,6$$

Так як розрахований частотний показник коливальності M рівний заданому частотному показнику при якому були розраховані оптимальні налаштування ПІ-регулятора, то можна зробити висновок, що розрахунок вірний.

Перехідні процеси для одноконтурної системи з ПІ-регулятором з параметрами розрахованими методом МАЧХ зображені по каналу «завдання-вихід» на рис. 3.48 та по каналу «збурення-вихід» на рис. 3.49. Прямі показники якості представлені в табл. 3.17.

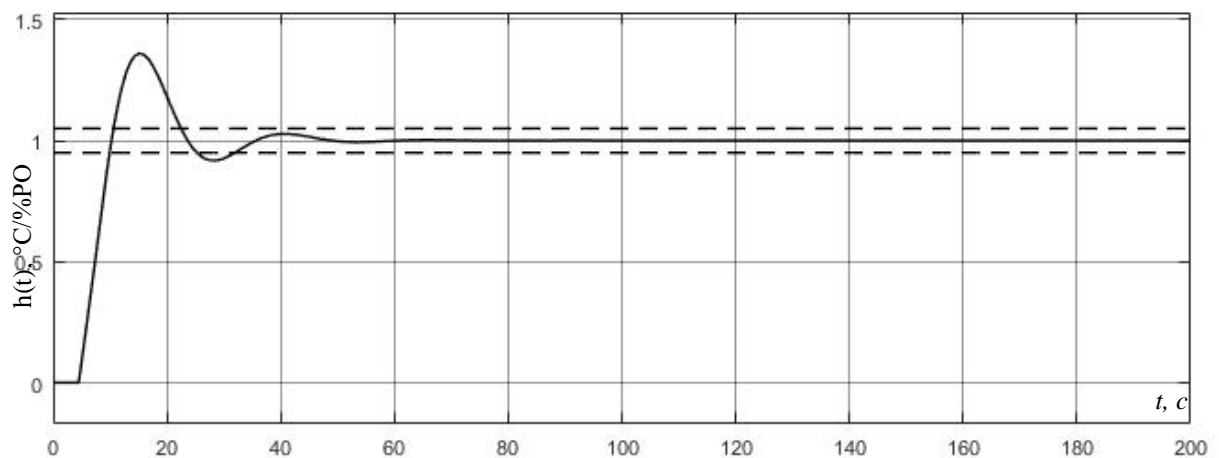


Рис. 3.48 Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

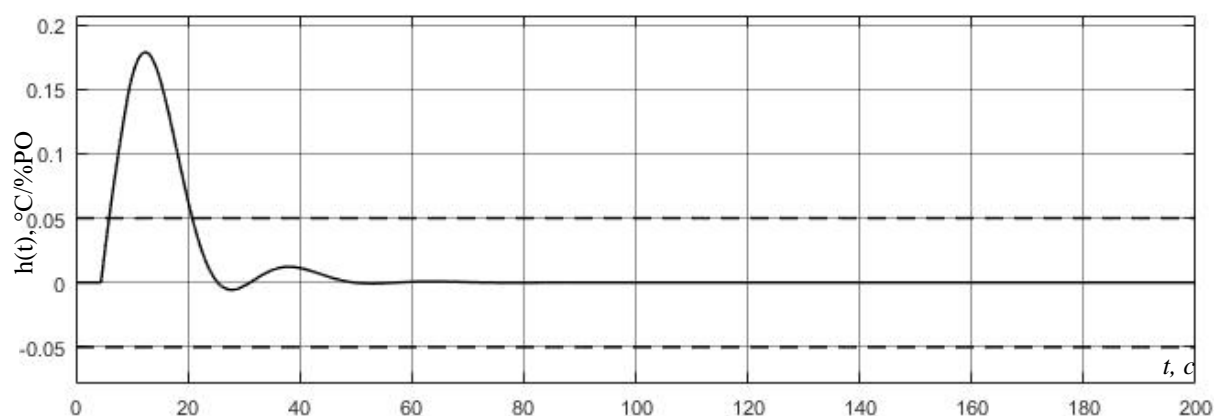


Рис. 3.49 Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.17 Прямі показники якості

Показник	«Завдання-вихід»	«Збурення-вихід»
Статична похибка $\Delta_{ст}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{дин}$	0,359	0,1787
Час регулювання $t_{рег}$, с	32	20,799
Ступінь затухання ψ	0,93	0,93
Перерегулювання σ , %	35,9	3,1

3.7.3 Розрахунок параметрів регулятора інженерним методом

Розрахуємо налаштування ПІ-регулятора інженерним експрес методом для моделі об'єкту типу (5.3) Chien et al. (1952). Model: Method 2 - regulator з 0% перерегулюванням за формулами:

$$K_p = \frac{0,6 \cdot T_m}{K_m \cdot \tau_m}, \quad (3.17)$$

$$T_i = 4\tau_m, \quad (3.18)$$

де K_m , T_m , τ_m – коефіцієнт передачі, постійна часу та транспортне запізнення об'єкту регулювання відповідно.

$$K_p = \frac{0,6 \cdot T_m}{K_m \cdot \tau_m} = \frac{0,6 \cdot 12}{0,44 \cdot 4,5} = 3,64; T_i = 4\tau_m = 4 * 4,5 = 18.$$

Перехідні процеси для одноконтурної системи з ПІ-регулятором з параметрами розрахованими інженерним методом зображені по каналу «завдання-вихід» на рис. 3.50 та по каналу «збурення-вихід» на рис. 3.51. Прямі показники якості представлені в табл. 3.18.

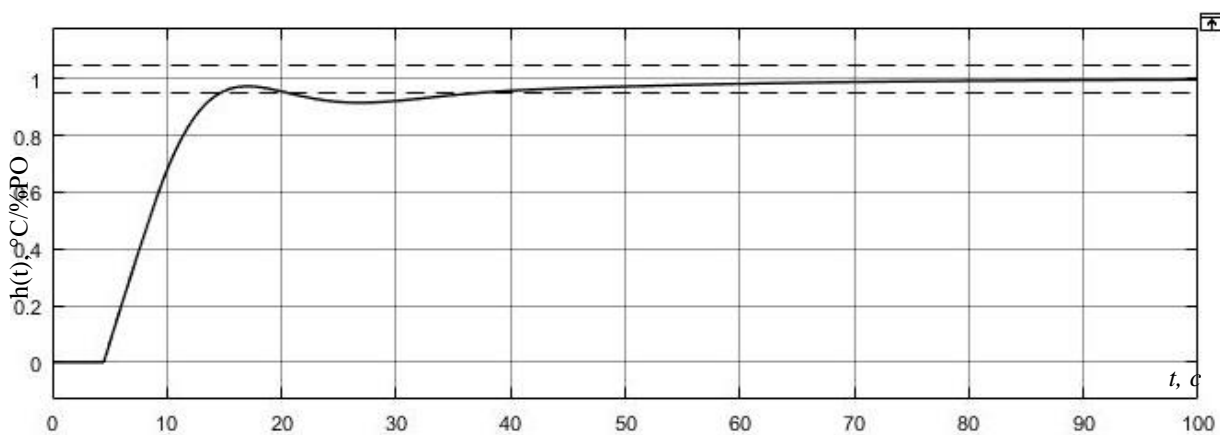


Рис. 3.50 Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

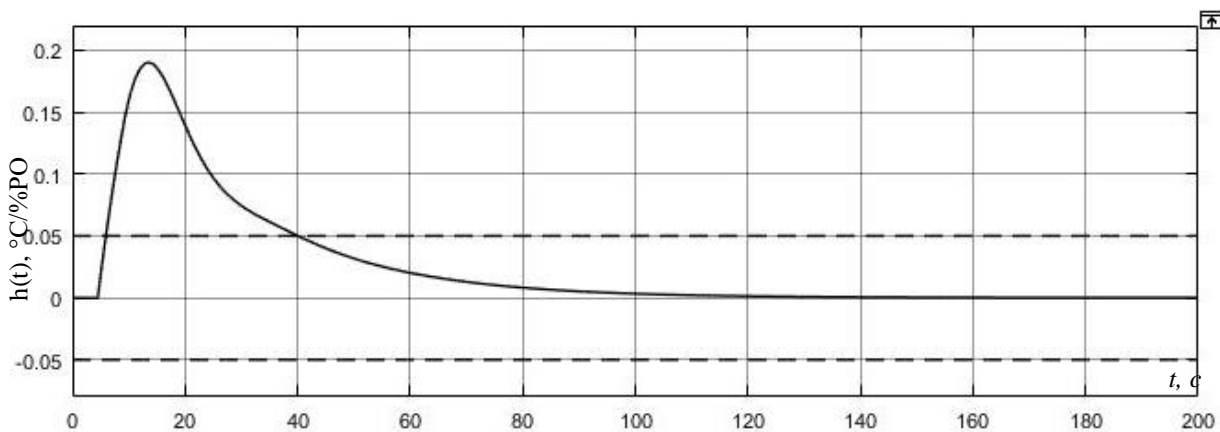


Рис. 3.51 Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.18 Прямі показники якості

Показник	«Завдання-вихід»	«Збурення-вихід»
Статична похибка $\Delta_{ст}$	0	0

Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0	0,19
Час регулювання $t_{\text{рег}}, \text{с}$	37,03	40,084
Ступінь затухання ψ	1	1
Перерегулювання $\sigma, \%$	0	0

3.7.4 Порівняння методів

На рис. 3.52 вказано перехідні процеси по каналу «завдання-вихід» розрахованими інженерним (позн. 3), РАФХ (позн. 1) та МАЧХ (позн. 2) методами. На рис. 3.53 вказано перехідні процеси по каналу «збурення-вихід» розрахованими інженерним (позн. 3), РАФХ (позн. 1) та МАЧХ (позн. 2). В табл. 3.19 виконане порівняння прямих показників якості перехідних процесів за каналами та методами розрахунку параметрів регулятора.

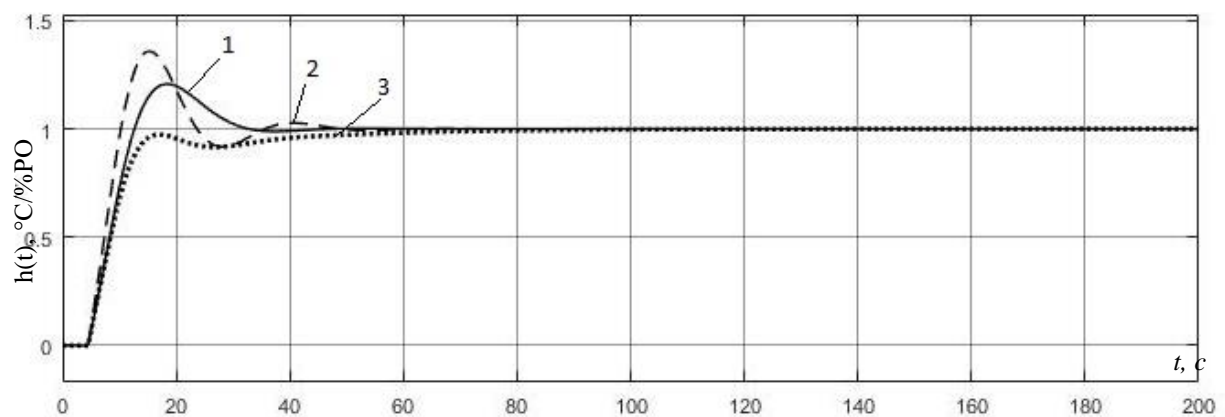


Рис. 3.52 Перехідний процес по каналу «завдання-вихід»

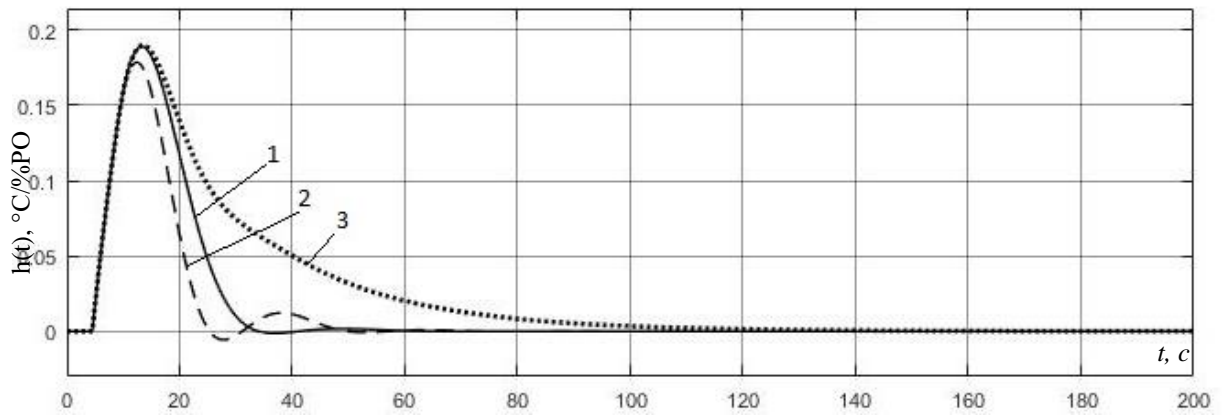


Рис. 3.53 Перехідний процес по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3.19 Порівняння прямих показників якості

Показник	«Завдання-вихід»			«Збурення-вихід»		
	РАФХ	МАЧХ	Інж. метод	РАФХ	МАЧХ	Інж. метод
Статична похибка $\Delta_{\text{ст}}$	0	0	0	0	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{\text{дин}}$	0,2	0,359	0	0,1892	0,1787	0,19
Час регулювання $t_{\text{рег}}$, с	28	32	37,03	24,78	20,799	40,084
Ступінь затухання ψ	0,99	0,93	1	0,991	0,93	1
Перерегулювання σ , %	20,7	35,9	0	0	3,1	0

З рис. 3.52 та 3.53 та прямих показників якості видно, що інженерний метод розрахунку Chien et al. (1952). Model: Method 2 - regulator з 0% перерегулюванням виявився найкращим з точки зору відсутності динамічної похибки і перерегулювання, а також найвищим ступенем затухання по каналу «завдання-вихід».

3.7.5 Дослідження системи автоматичного керування на грубість

Під грубістю одноконтурної САР розуміють малу чуттєвість критерію функціонування до варіацій параметрів замкненої АСК.

Для дослідження системи при оптимальних параметрах налаштування регулятора побудуємо 3 перехідних характеристики при змінному $T_{об}$ та 3 перехідних характеристики при змінному $\tau_{об}$. Варіації параметрів проведемо в діапазоні 10% по каналу "завдання-вихід".

На рис. 3.25 зображено перехідні процеси з варіацією $T_{об}$.

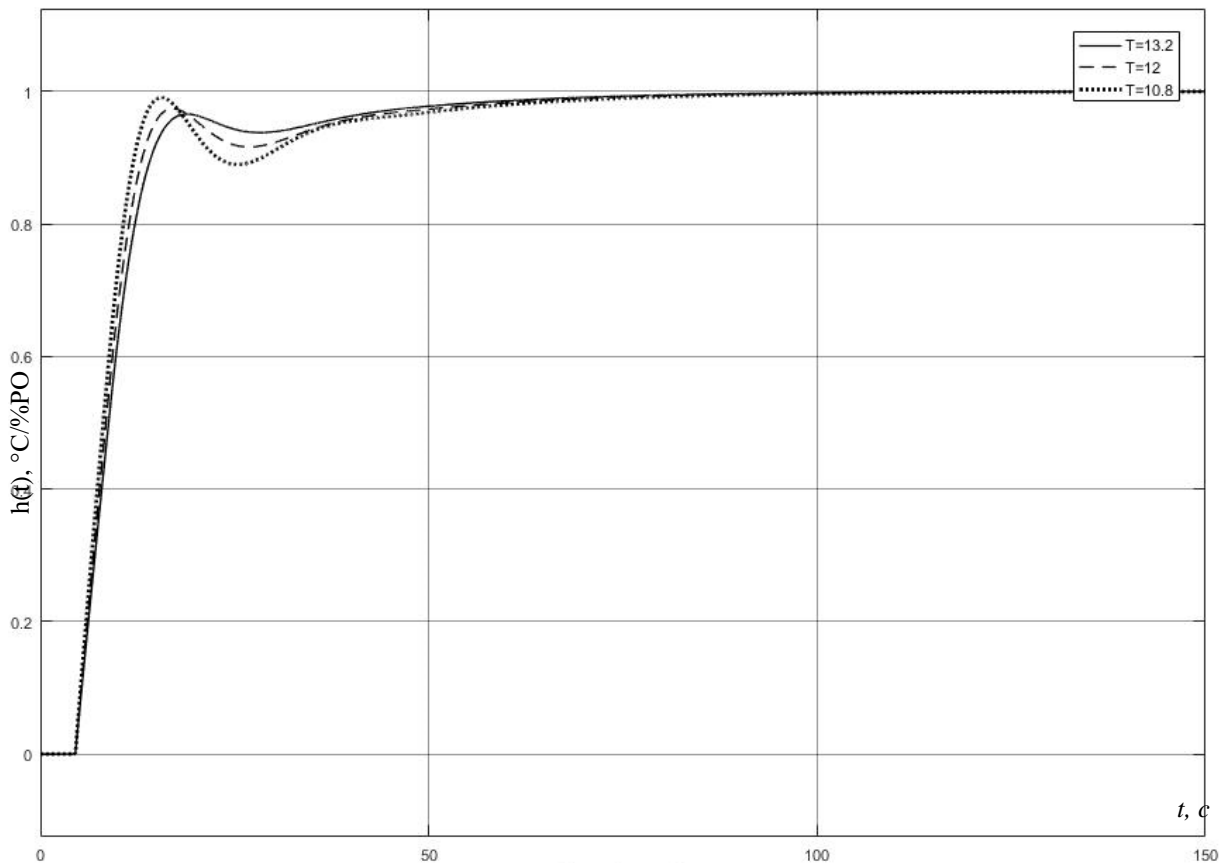


Рис. 3.54 Перехідні процеси у замкненій системі

У таблиці 3.20 показано варіацію сталої часу об'єкта і відповідні значення часу перехідного процесу, максимального динамічного відхилення, статичної помилки, перерегулювання та степінь згасання.

Таблиця 3.20 Варіація сталої часу

$T_{об}$	$t_{пп}$	$\Delta_{дин}$	$\Delta_{ст}$	$\sigma, \%$	ψ
13,2	34,92	0	0	0	1
12	37,028	0	0	0	1
10,8	37,71	0	0	0	1

За отриманими даними були побудовані функції чутливості для параметру $t_{пп}$ (рис. 3.55).

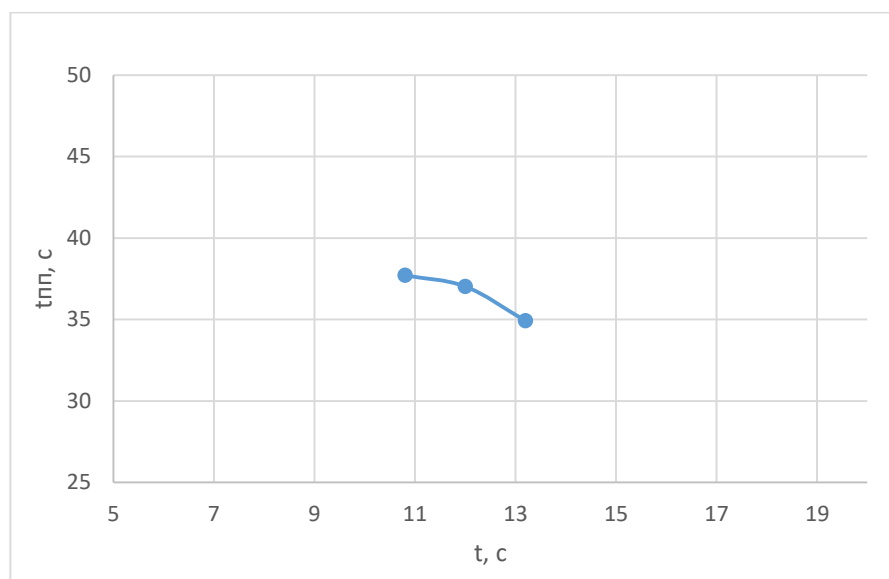


Рис. 3.55 Функція чутливості для часу перехідного процесу

Розрахуємо відносні коефіцієнти чутливості за наступною формулою:

$$k_z = \frac{\left| \frac{R - R^{opt}}{R^{opt}} \right|}{\left| \frac{Z - Z^{opt}}{Z^{opt}} \right|} \quad (3.16)$$

де k_z – відносний коефіцієнт чутливості для змінного параметра Z ;

Z – поточне значення параметра;

Z^{opt} – оптимальне значення параметра;

R, R^{opt} – відповідно поточне значення критерію якості та значення при оптимальних параметрах.

$$k_{T_{t_{пп}1}} = \frac{\left| \frac{t_{пп} - t_{пп}^{opt}}{t_{пп}^{opt}} \right|}{\left| \frac{T - T^{opt}}{T^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{34,92 - 37,028}{37,028} \right|}{\left| \frac{13,2 - 12}{12} \right|} = 0,569$$

$$k_{T_{t_{пп}2}} = \frac{\left| \frac{t_{пп} - t_{пп}^{opt}}{t_{пп}^{opt}} \right|}{\left| \frac{T - T^{opt}}{T^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{37,71 - 37,028}{37,028} \right|}{\left| \frac{10,8 - 12}{12} \right|} = 0,184$$

$$k_{T_{\Delta_{дин}1}} = 0 \quad k_{T_{\Delta_{дин}2}} = 0$$

$$k_{T_{\sigma}1} = 0 \quad k_{T_{\sigma}2} = 0$$

$$k_{T_{\Delta_{ст}1}} = 0 \quad k_{T_{\Delta_{ст}2}} = 0$$

$$k_{T_{\psi}1} = 0 \quad k_{T_{\psi}2} = 0$$

На рис. 3.56 зображено перехідні процеси з варіацією $\tau_{об}$.

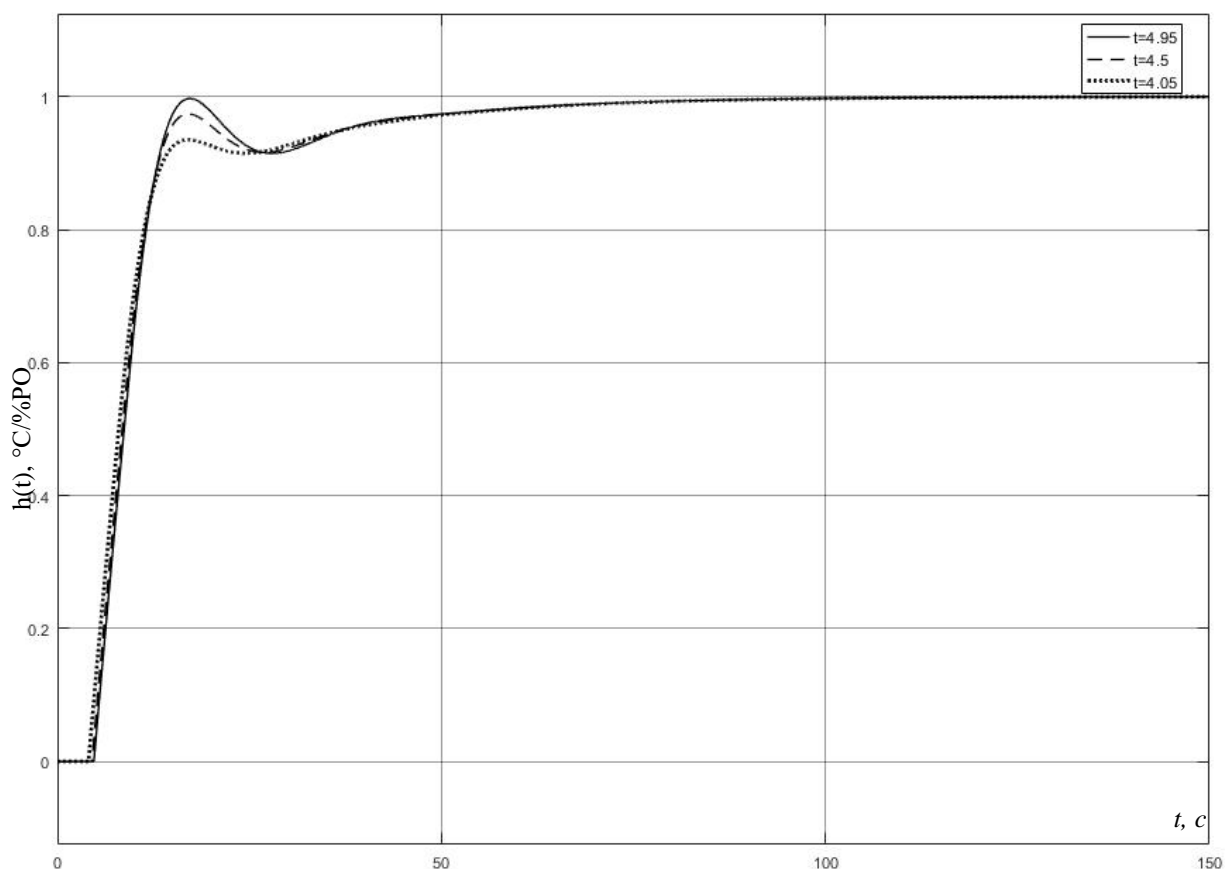


Рис. 3.56 Перехідні процеси у замкненій системі

У таблиці 3.21 показано варіацію сталої часу об'єкта і відповідні значення часу перехідного процесу, максимального динамічного відхилення, статичної помилки, перерегулювання та степені згасання.

Таблиця 3.21 Варіація сталої часу

$\tau_{об}$	$t_{пп}$	$\Delta_{дин}$	$\Delta_{ст}$	$\sigma, \%$	ψ
4,95	37,219	0	0	0	1
4,5	37,028	0	0	0	1
4,05	37,198	0	0	0	1

За отриманими даними були побудовані функції чутливості для параметрів та $t_{пп}$ (рис. 3.57).

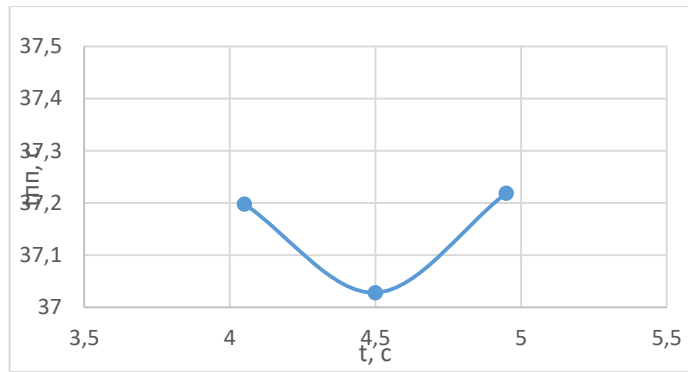


Рис. 3.57 Функція чутливості для часу перехідного процесу

$$k_{\tau_{t_{пп}}1} = \frac{\left| \frac{t_{пп} - t_{пп}^{opt}}{t_{пп}^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{37,219 - 37,028}{37,028} \right|}{\left| \frac{4,95 - 4,5}{4,5} \right|} = 0,0515$$

$$k_{\tau_{t_{пп}}2} = \frac{\left| \frac{t_{пп} - t_{пп}^{opt}}{t_{пп}^{opt}} \right|}{\left| \frac{\tau - \tau^{opt}}{\tau^{opt}} \right|} = \frac{\left| \frac{37,198 - 37,028}{37,028} \right|}{\left| \frac{4,05 - 4,5}{4,5} \right|} = 0,0184$$

$$k_{\tau_{\Delta_{дин}}1} = 0 \quad k_{\tau_{\Delta_{дин}}2} = 0$$

$$k_{\tau_{\sigma}1} = 0 \quad k_{\tau_{\sigma}2} = 0$$

$$k_{\tau_{\Delta_{ст}}1} = 0 \quad k_{\tau_{\Delta_{ст}}2} = 0$$

$$k_{\tau_{\psi}1} = 0 \quad k_{\tau_{\psi}2} = 0$$

Оскільки коефіцієнт чутливості у всіх випадках менше 0,1, то можна стверджувати, що система є грубою.

В розділі було розраховано вимірювальні канали і здійснено розрахунок надійності реалізації функцій автоматичної системи регулювання. Результати показали, що вимірювальні канали і надійність реалізації функцій відповідають вимогам до системи.

Також було здійснено розрахунок параметрів регулятора інженерним методом і методами МАЧХ та РАФХ.

4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ОБ'ЄКТОМ

4.1. Опис програмно-технічних рішень локального рівня ПТКЗА

4.1.1. Порядок програмування контролера та обмін даними з верхнім рівнем автоматизації

Основою нижнього рівня системи автоматизації є контролер Siemens S7-1500. Для програмування контролера використовується система програмування

Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal).

Розробка проектів для контролерів і пристроїв розподіленого вводу-виводу, конфігурація систем людино-машинного інтерфейсу і SCADA систем, налагодження програмних алгоритмів управління, а так же введення в експлуатацію приводів - все це об'єднано в загальну структуру програмного забезпечення та мають уніфікований інтерфейс.

Перед початком програмування контролера складається конфігурація системи: центральний процесор, модулі вводу/виводу та блоки живлення. Після конфігурації контролера потрібно налаштувати мережеве з'єднання, присвоїти адреса всім входам та виходам і обрати правильні налаштування кожного вводу/виводу.

Під час програмування контролера створюються бази даних в яких зберігаються теги із значеннями. Через інтерфейс Profinet/Ethernet теги із бази даних передаються на верхній рівень автоматизації.

4.1.2. Реалізація функцій нижнього рівня системи автоматизації

Реалізація регулювання температури в топці нагрівального колодязя

пара:

1. В топці колодязя знаходиться термометр опору ТПЗ.
2. Сигнал передається на вхід модуля аналогового вводу SM531.
3. Модуль аналогового вводу SM531 передає значення сигналу на модуль CPU 1511-1PN.
4. CPU 1511-1PN по шині передачі даних передає керуючі сигнали на модуль дискретного виводу SM532, які поступають на пристрої плавного пуску, які запускають в дію електроприводи МЕО.

Реалізація регулювання витрати палива та повітря:

1. Витрата палива та повітря вимірюється завдяки витратомірам FUG1010, що встановлені на трубопроводах, вихідний сигнал 4-20мА.
2. Струмові сигнали передаються на вхід модуля аналогового вводу SM531.
3. Модуль аналогового вводу SM531 передає значення сигналу на модуль CPU 1511-1PN.
4. CPU 1511-1PN по шині передачі даних передає керуючі сигнали на модуль дискретного виводу SM532, які поступають на пристрої плавного пуску, які запускають в дію електроприводи МЕО.

Реалізація регулювання тиску в деаераторі:

1. Виконуються виміри тиску датчиком XMLK100P2D23, вихідний сигнал 4-20мА.
2. Струмовий сигнал передається на вхід модуля аналогового вводу SM531.
3. Модуль аналогового вводу SM531 передає значення сигналу на модуль CPU 1511-1PN.
4. CPU 1511-1PN по шині передачі даних передає керуючі сигнали на

модуль дискретного виводу SM532, які поступають на пристрої плавного пуску, які запускають в дію електроприводи МЕО.

4.2. Опис програмно-технічних рішень супервізорного рівня ПТКЗА

Основою супервізорного рівня системи автоматизації є SCADA-система. SCADA-система в даній роботі реалізує відображення мнемосхеми технологічного процесу та значень технологічних параметрів, виконує архівацію всіх технологічних параметрів, реєстрацію спрацювання технологічної сигналізації, відображає у вигляді графіків технологічні параметри із архіву і параметри в реальному часі, обмін даними з контролером.

Створення даної системи виконується за допомогою системи програмування TIA Portal V15.

Для створення SCADA-системи необхідно створити новий проект, додати до проекту робочу станцію та налаштувати її зв'язок з контролером.

Після цього необхідно реалізувати весь необхідний функціонал даної системи.

Для відладки SCADA-системи можна скористатись режимом симуляції.

SCADA-система в даній роботі реалізовує такі функції:

- обмін даними з нижнім рівнем ПТКЗА;
- наглядне відображення роботи технологічного об'єкту у вікні мнемосхеми із значеннями технологічних параметрів та можливістю ручного керування об'єктом;

– відображення трендів та фіксування тривог у відповідних вікнах, що забезпечують відслідковування та сповіщення про недопустимі значення технологічних параметрів.

Перераховані функції забезпечують повноцінне функціонування SCADA-програми в рамках верхнього рівня ПТКЗА, оскільки забезпечують повне інформаційне забезпечення оператора про стан технологічного процесу та реалізують відповідні можливості дистанційної взаємодії оператора з технологічним об'єктом.

В SCADA-системі ручне керування технологічним процесом виконується в окремому вікні, де перехід між автоматичним та ручним режимом виконується за допомогою кнопок Автоматичний/Ручний.

Ручне керування технологічним процесом реалізовано у якості зміни завдання регульованих параметрів та можливістю задавати керуюче значення для виконавчого механізму та частотних перетворювачів.

4.3 Опис Локального рівня

Програмне забезпечення локального рівня ПТКЗА створено за допомогою середовища програмування контролерів TIA Portal V15.

Для регулювання витрати палива по температурі було використано блок CONT_C за допомогою якого реалізовувався ПІ закон.

Для регулювання тиску в топці колодязя був використаний також блок CONT_C, за допомогою якого реалізовувався ПІ закон регулювання.

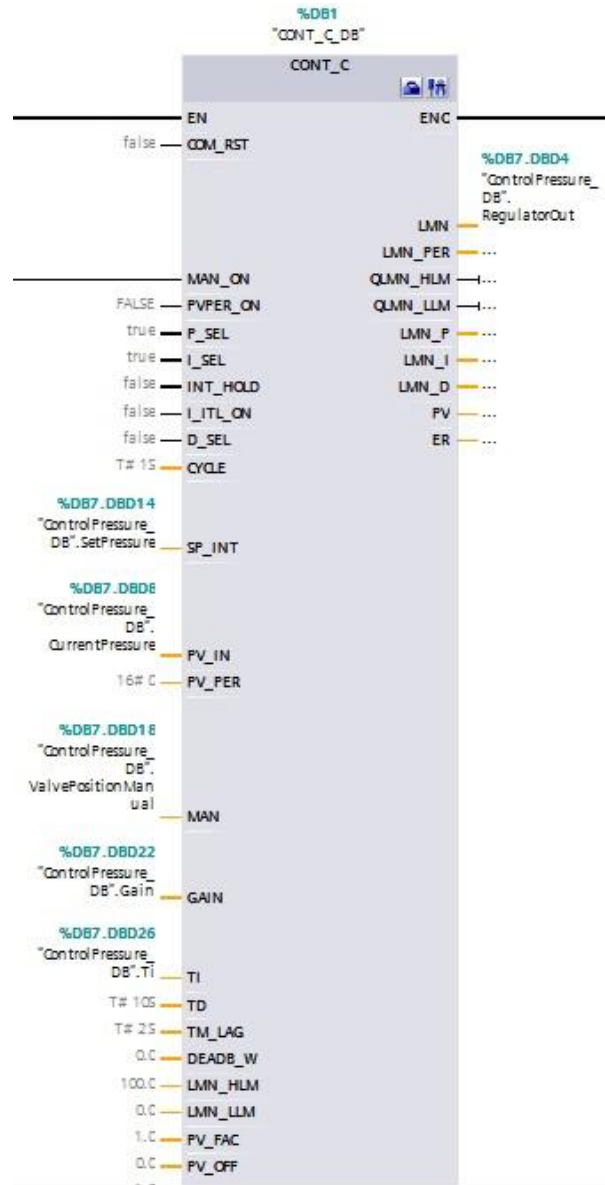


Рис. 4.2. Регулятор тиску

SetpointPressure – завдання на тиск в топці нагрівального колодязя;

CurrentPressure – Поточний тиск в топці нагрівального колодязя

ManualSwitch – включення ручного режиму управління;

ValvePositionManual – завдання положення ВМ в ручному режимі;

Gain, Ti – налаштування регулятора;

RegularOut – вихідний сигнал на ВМ

Розраховані дії регуляторів передаються на об'єкт через функціональний блок, що описує виконавчий механізм. Даний блок використовується для усіх контурів і зображений на рис. 4.3

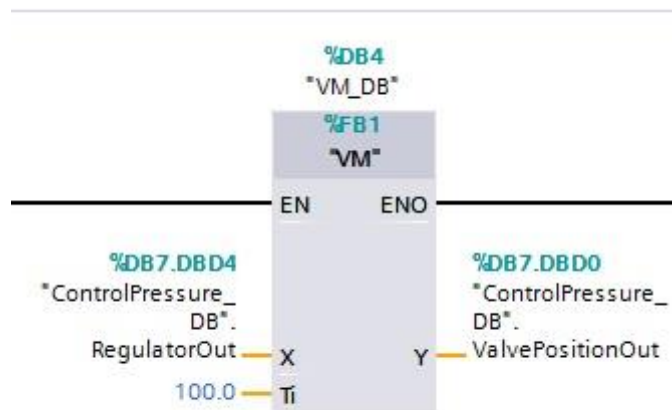


Рис.4.3. Функціональний блок ВМ для контуру регулювання витрати живильної води

В даному блоці на вхід X подається сигнал від відповідних регуляторів контурів, що наведені вище. Мінімальне та максимальне значення виходу ВМ жорстко задаються і визначаються реальними обмеженнями (кут повороту, крайні положення штоку, тощо). Код реалізації блоку представлені на рис.4.4.


```

1 IF #Y < #X THEN
2     #Y := #Y + #X * #h / #Ti;
3 IF #Y >= #X THEN
4     #Y := #X;
5 END_IF;
6 END_IF;
7 IF #Y > #X THEN
8     #Y := #Y + (#X - 100) * #h / #Ti;
9 IF #Y <= #X THEN
10    #Y := #X;
11 END_IF;
12 END_IF;

```

Рис.4.4. Функціональний блок, що описує ВМ

Для реалізації сигналізації та блокування були створені алгоритми аналогічні кожному з контурів регулювання. Вони представлені на рис. 4.5 та рис. 4.6.

При виході параметру за допустимі межі спрацьовує відповідний аларм і якщо протягом визначеного часу цей параметр залишається поза допустимими значеннями – запускається відповідний алгоритм блокування.

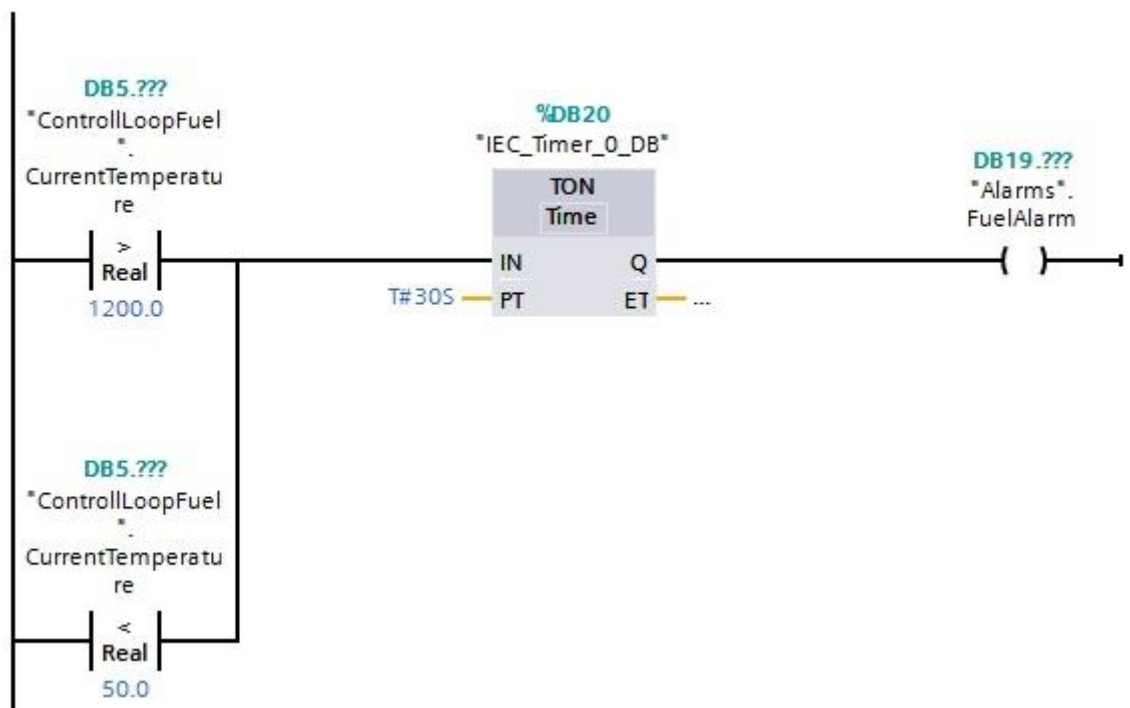


Рис.4.5. Алгоритм сигналізації виходу параметру за аварійні межі

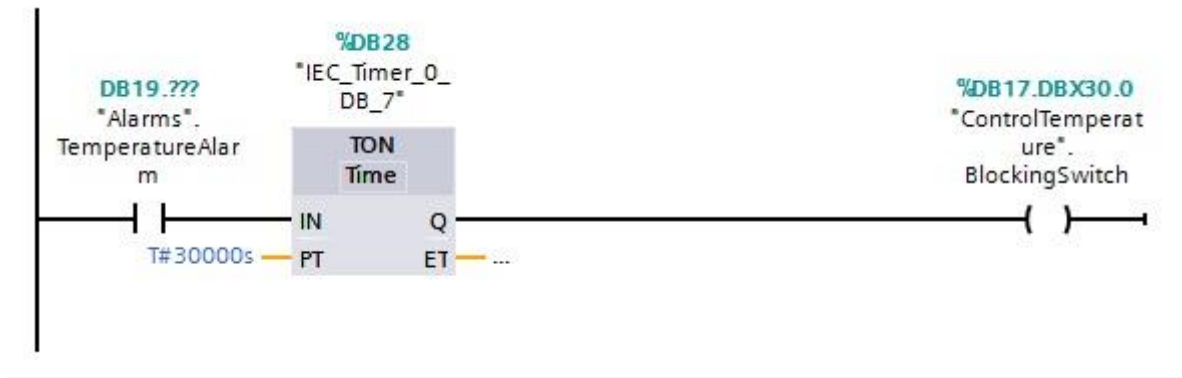


Рис.4.6. Алгоритм блокування

4.3 Опис супервізорного рівня

Програмне забезпечення верхнього рівня системи автоматизації представлене у вигляді SCADA-системи. Вона включає в себе наступні розроблені вікна: головна мнемосхема, тренди, аларми та вікна налаштувань.

На головному вікні мнемосхеми зображено об'єкт та його технологічні параметри (рис. 4.7).

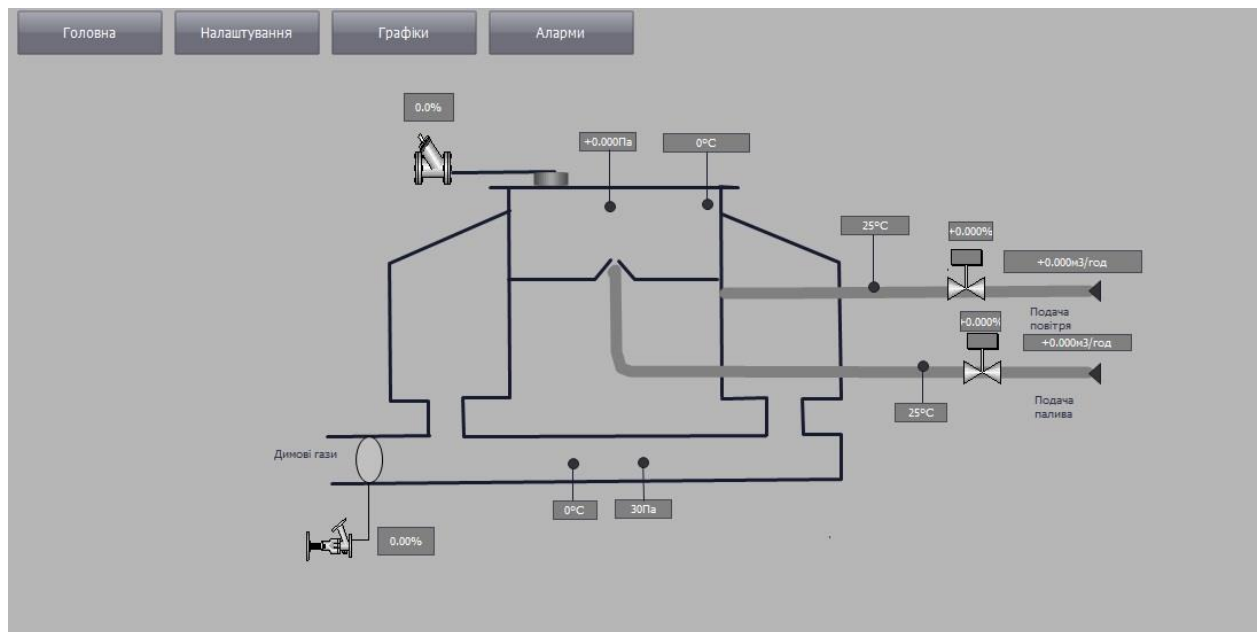


Рис.4.7. Мнемосхема нагрівального колодязя

При натисненні на зображення клапанів ми переходимо у вікно налаштувань, де можемо перейти в ручний режим керування і самостійно задати положення ВМ, або поставити потрібне завдання в автоматичному режимі (рис.4.8).

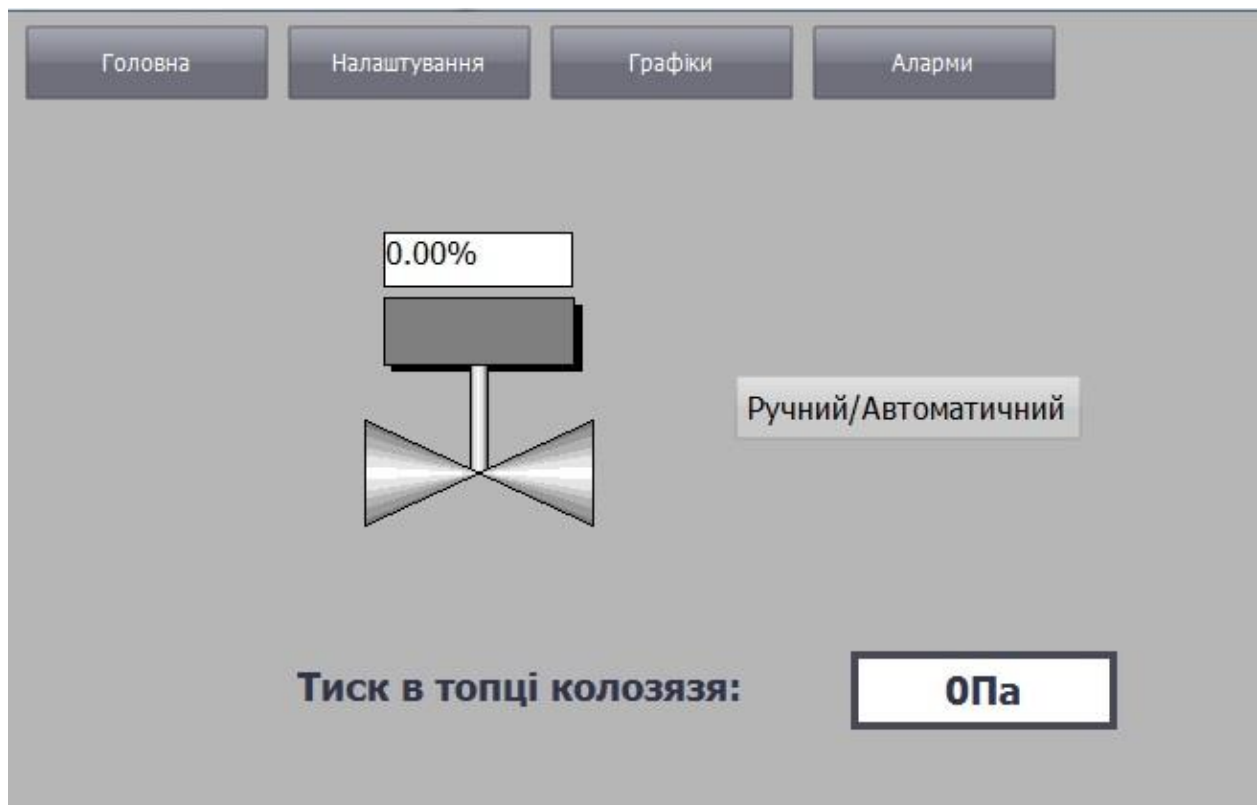


Рис.4.8. Вікно налаштувань при натисненні на клапан

При натисненні на вкладку «Налаштування» оператор попадає у вікно налаштувань параметрів регуляторів наявних у контурах. Відповідний скрін наведено на рис. 4.9.

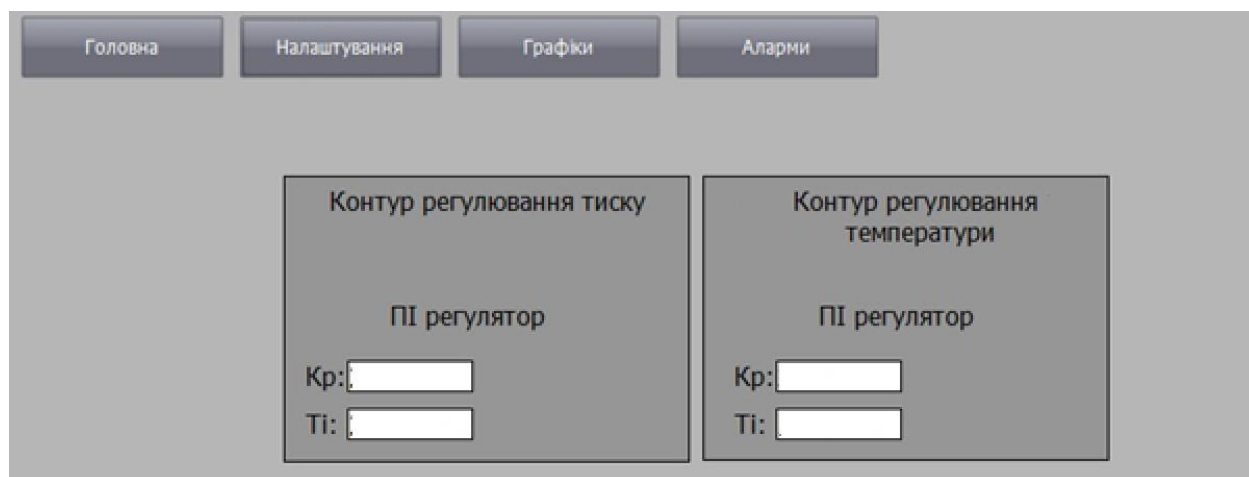
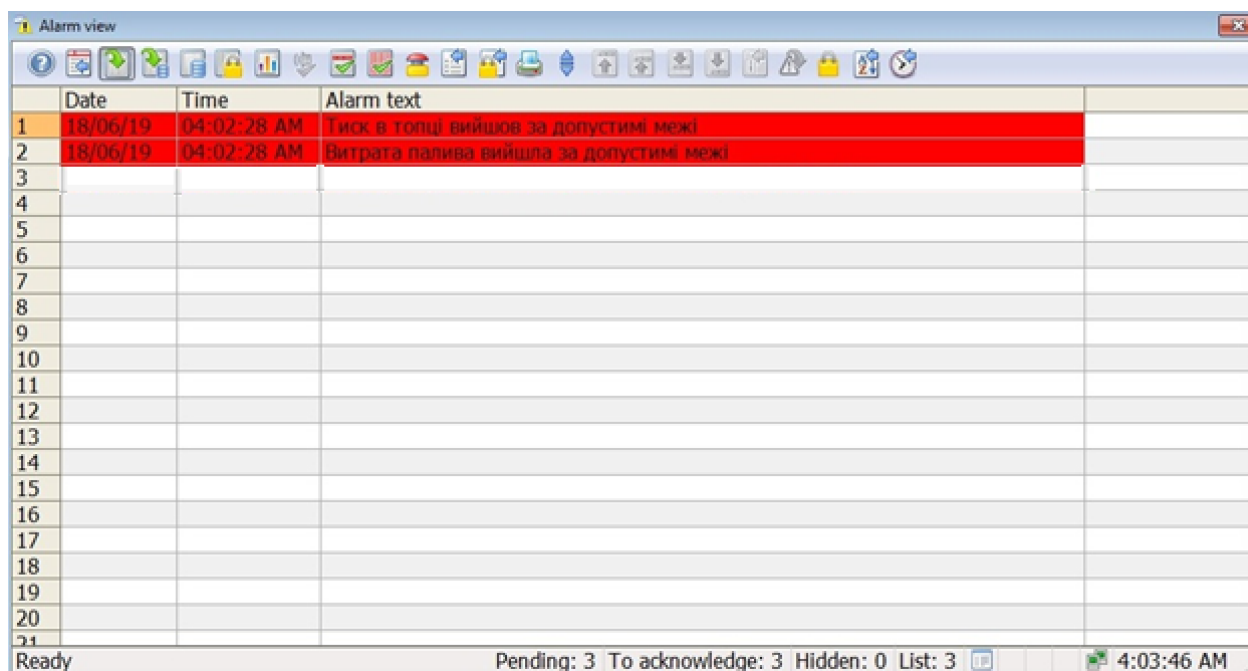


Рис.4.9. Вікно налаштувань параметрів регуляторів та диференціаторів

Також було створено вікно сигналізації, де відображені аларми реального часу (рис.4.10). Коли параметр повернеться в допустимі межі – фон попередження зміниться на білий.



	Date	Time	Alarm text
1	18/06/19	04:02:28 AM	Тиск в топці вийшов за допустимі межі
2	18/06/19	04:02:28 AM	Витрата палива вийшла за допустимі межі
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			

Ready Pending: 3 To acknowledge: 3 Hidden: 0 List: 3 4:03:46 AM

Рис.4.10. Вікно алармів

Для основних регульованих параметрів були створенні вікна трендів, де відображається значення регульованого параметру контуру та відповідне завдання.

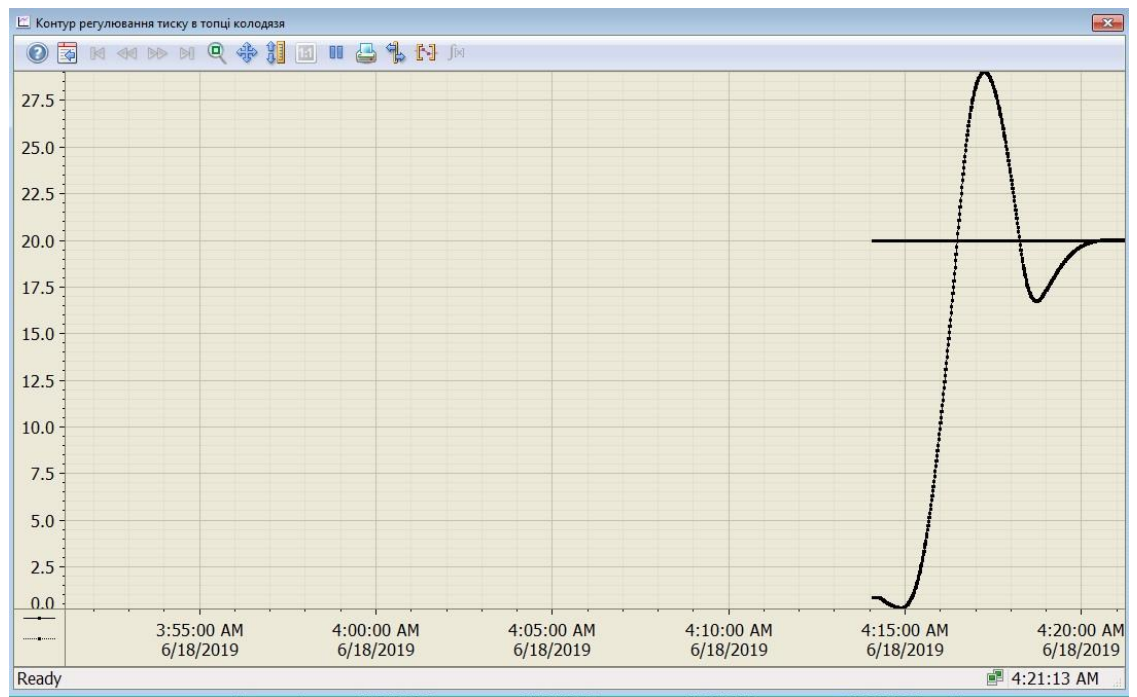


Рис. 4.11. Вікно трендів контуру регулювання тиску

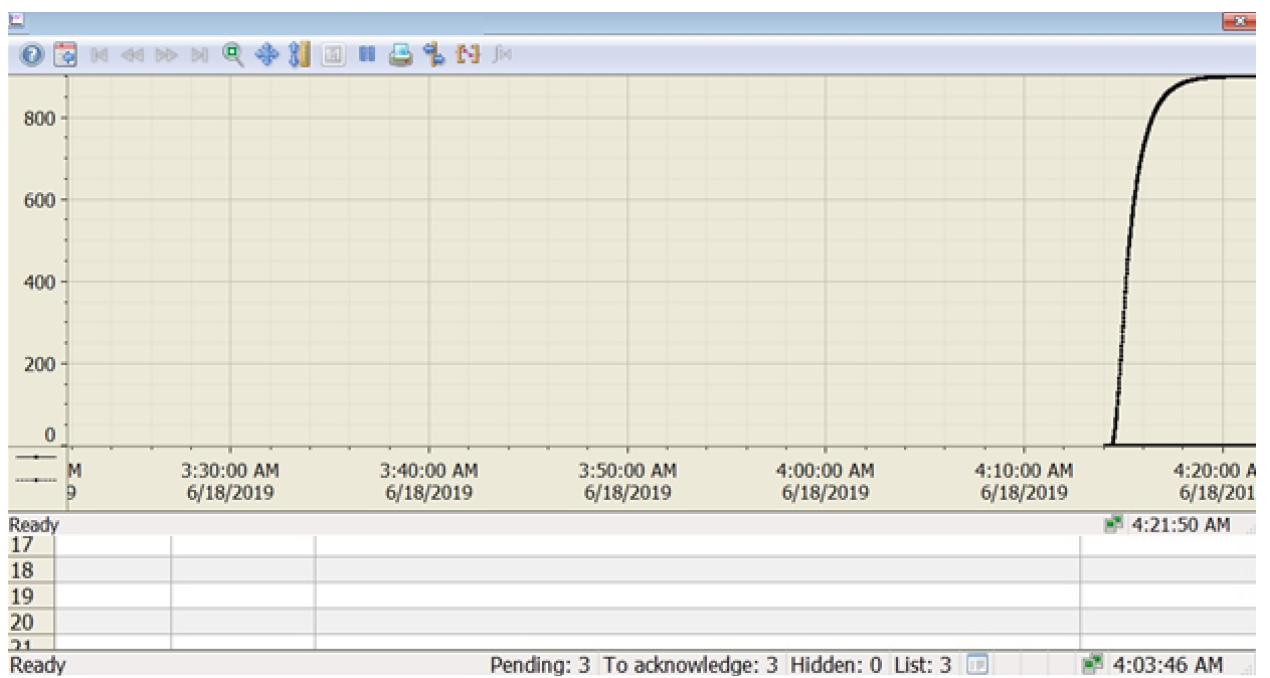


Рис. 4.12. Вікно трендів контуру регулювання витрати палива по температурі в топці нагрівального колодзя

4.4 Порядок перевірки системи автоматизації

Для перевірки працездатності системи мною було створено функціональні блоки, що описують поведінку контурів. Вони представляють собою аперіодичні ланки I порядку.

Розглянемо основні контури регулювання.

1) Контур регулювання тиску в топці колодязя (Рис.4.15)

$$\text{Об'єкт: } W = \frac{0.44}{12s+1} * e^{-4,5p}$$

Вихід регулятора під'єднаний до входу виконавчого механізму. Код виконавчого механізму представлений на рис.4.5. Вихідний сигнал з ВМ заходить на вхід аперіодичної ланки 1-го порядку, що є моделлю об'єкту регулювання. Відповідний код реалізації ланки зображено на рис 4.14.

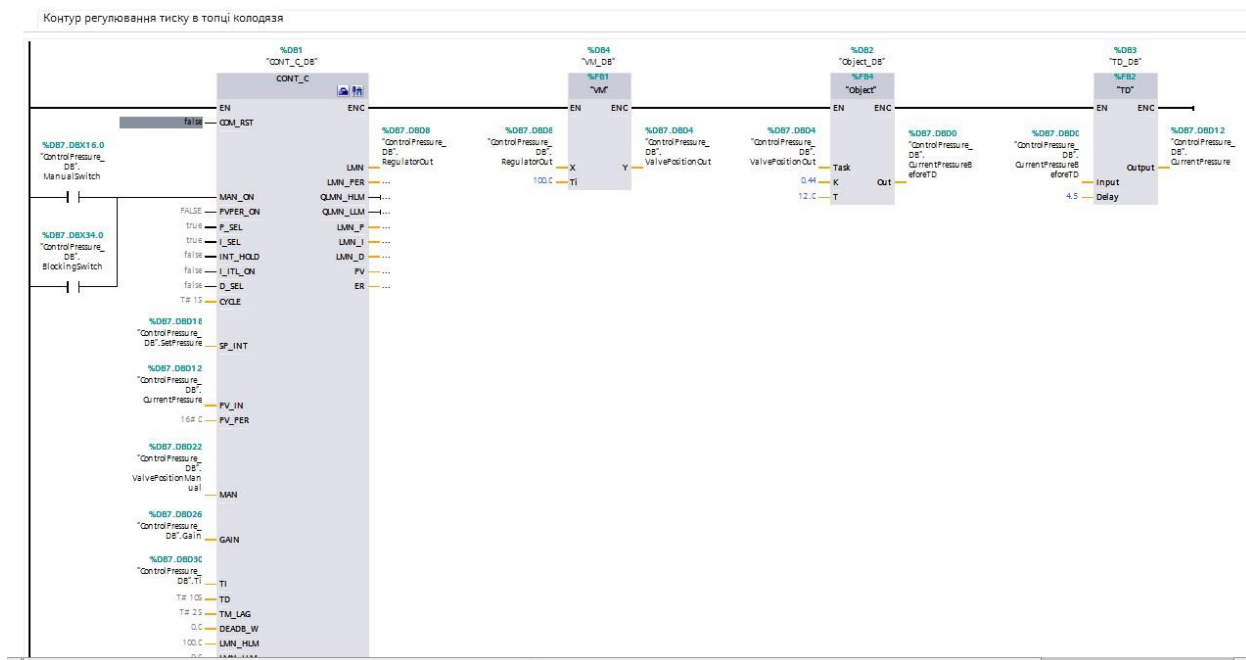


Рис.4.14. Контур керування тиском в топці колодязя

```

1 #h := 1;
2 #Out := #T / (#h + #T) * #Out + #h / (#h + #T) * #K * #Task;

```

Рис.4.15. Функціональний блок АП ланки 1-го порядку

2) Контур регулювання температури шляхом витрати палива в топці колодязя (Рис.4.16)

- Об'єкт: $W = \frac{0,7}{40s+1} * e^{-5p}$

Вихід регулятора під'єднаний до входу виконавчого механізму. Код виконавчого механізму представлений на рис.4.5. Вихідний сигнал з ВМ заходить на вхід аперіодичної ланки 1-го порядку, що є моделлю об'єкту регулювання. Відповідний код реалізації ланки зображено на рис 4.6.

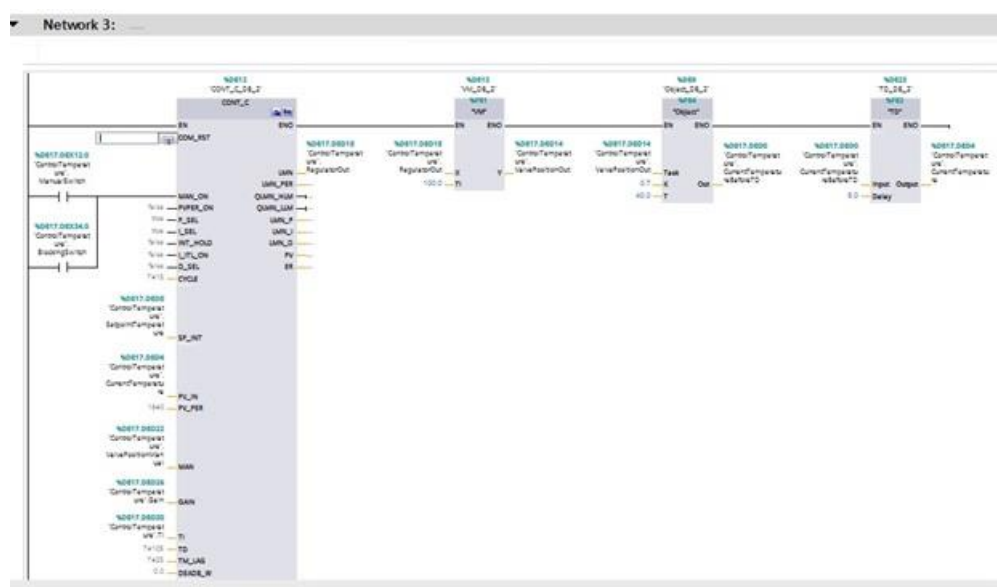


Рис.4.16. Контур регулювання витратою палива по температурі

Для перевірки функції автоматичного контролю необхідно запустити SCADA-програму на робочій станції оператора та відкрити головну мнемосхему. Усі цифрові показчики повинні відображати числові значення параметрів системи. Якщо значення не відображаються, то функція контролю

працює не коректно. На рис. 4.18 всі параметри відображаються коректно, а отже функція контролю працює і відповідає вимогам.

Для перевірки функцій регулювання необхідно у вікні налаштувань, що відкривається при кліку на клапан, встановити значення завдання для регулятора. Далі перейшовши на головну мнемосхему можна прослідкувати зміну значень відповідних контрольованих параметрів на цифрових показниках або відкрити перехідний процес у вікні трендів.

Для перевірки переходу з автоматичного режиму в ручний необхідно змінити стан кнопки «Ручний/Автоматичний» у вікні налаштувань зображеному на рис. 4.18 і з'явиться відповідне поле для вводу положення ВМ. При цьому регулятор плавно переведе виконавчий механізм в положення, що відповідає значенню уставки введеній вручну.

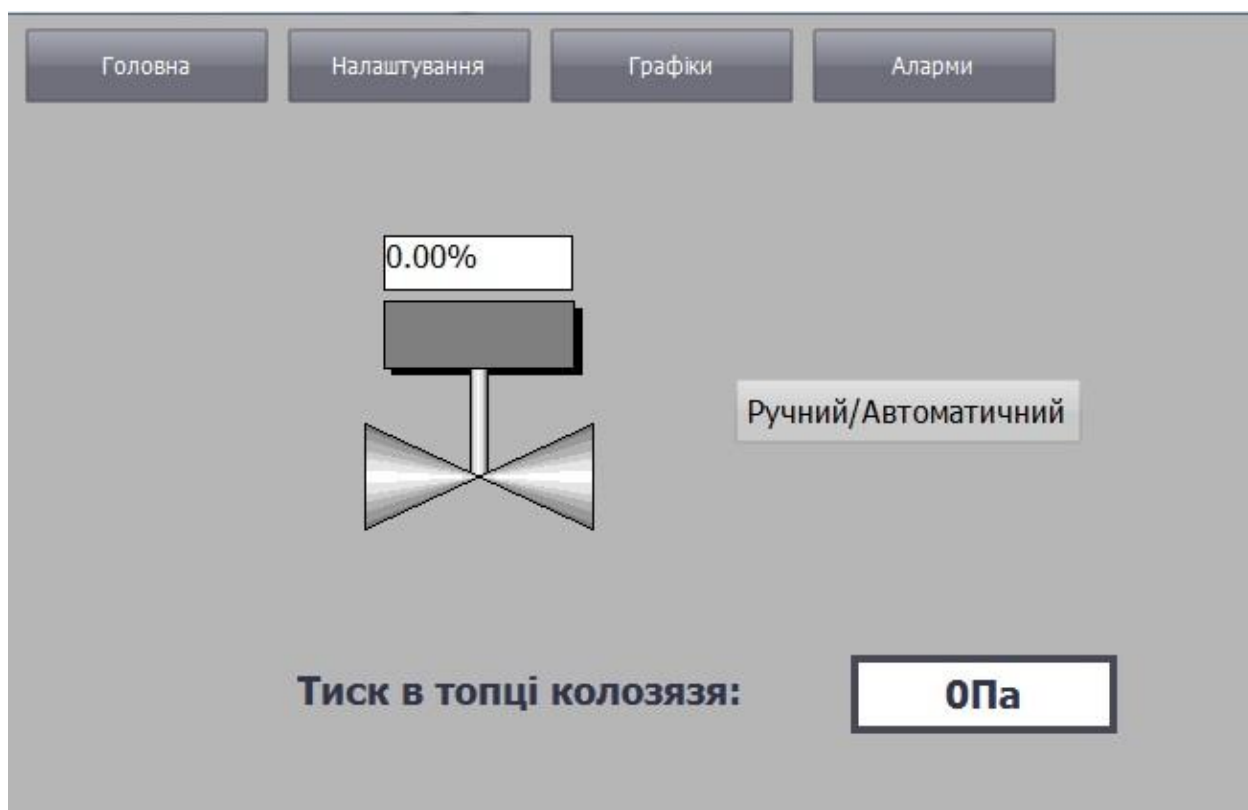


Рис.4.18. Вікно налаштувань та перемикання одного з контурів в режим ручного управління

Отже з огляду на отримані дані можна зробити висновок, що функція ручного управління працює правильно.

Для перевірки функцій сигналізації необхідно за допомогою ручного режиму керування вивести параметри регулювання за технологічні межі. У вікні Alarms Log (Рис.4.10) можна побачити активні та історичні аварії в системі. Виходячи з цього робимо висновок, що функція сигналізації працює правильно.

Для перевірки функцій блокування необхідно виконати алгоритм перевірки функції сигналізації. При виникненні аварії система почне відпрацьовувати алгоритми захисту переводячи систему в потрібний режим роботи.

5. СТАРТАП

Сьогодні стартапом називають нову компанію, яка може бути не зареєстрована офіційно, але в скорий час стане офіційною. Компанія яка будує свій бізнес на основі інновацій або інноваційних технологій, також компанія, яка не вийшла на ринок або тільки почала робити перші кроки для виходу та має становище з обмеженими ресурсами. Особливо часто термін «стартап» застосовується відносно інтернет-компаній, які працюють в сфері ІТ, проте, це поняття розповсюджується і на інші сфери діяльності.

Інновації, на основі яких будують свій бізнес стартапи, можуть бути як глобальними (тобто бути інноваціями у всьому світі), так і локальними

(тобто, бути інновацією в окремо узятій країні, але при цьому в інших країнах ця технологія вже не є інноваційною).

Формальними критеріями для визначення компанії як стартап проекту зазвичай виступає вік компанії, число співробітників, прибуток та зріст, наукомісткий характер продукту, контроль засновників над компанією. Однак, Пол Грем(відомий програміст на мові Лісп, венчурний інвестор та есеїст) стверджує, що наявність технологічної інновації та венчурного фінансування не має значення, а малий вік не чинить компанію стартапом . Часте використання поняття в контексті технологічних компаній характеризує роль технологій у забезпеченні сталого зростання - але не має на увазі технологічний характер як обов'язкову характеристику стартап-проекту.

Деякі стартаперів розглядають стартапи як культурний феномен - спільні цінності всіх членів команди і відчуття значущості вкладу кожного співробітника. Вони стверджують, що збереження цієї культури дозволяє вважати команду стартапом незалежно від розміру та контролю засновників над компанією.

Останнім часом стартап часто розглядають з точки зору краудфандінга, проекту створеного стартаперами для збору колективних засобів для реалізації спільних цінностей.

5.1 Загальна характеристика ідеї стартап-проекту

Мій стартап проект – це створення додатку, на платформі Android з використанням Android SDK, який буде здатний в режимі реального часу

показувати стан роботи системи, та надавати можливість передавати команду на контролер, для відпрацювання запрограмованого алгоритму.

На сьогоднішній день, даний проект може бути реалізований для великої кількості контролерів, додаток може бути підлаштованим під роботу систему, яку забажає замовник, та показ конкретних параметрів які йому потрібні.

Створивши додаток для однієї системи, можна демонструвати велику кількість можливостей додатку, та починати вихід на ринок.

Головним ринком попиту будуть підприємства з високим рівнем автоматизації своїх виробничих процесів, що прагнуть оптимізувати свій час, та отримати можливість спостерігати за роботою своєї системи з будь якої точки світу. Компанія, яка вкладеться в розробку додатку, може отримати компактний доступ до всіх своїх систем, де можна буде спостерігати за роботою систем, або ж сконцентруватись на певному параметрі системи та мати можливість впливати на нього, і це все з пристрою з кишені. Отже з переваг можна виділити:

- Зручний інтерфейс, який обирає замовник
- Можливість споглядати за роботою системи в будь який час та з будь якого місця
- Можливість швидкої реакція на порушення роботи системи
- Можливість відправляти сигнал який буде впливати на роботу системи

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 5.1 Технологічний аудит проекту

№	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
---	--------------	--------------------------	----------------------	------------------------

1	Розробка додатку на платформі Android для контролю системи	Платформа Android, Android SDK, Retrofit2, Nodejs, expressjs, axios,	Технології наявні, потрібно розробити програмну реалізацію додатку, та доходження даних до нього.	Усі описані технології знаходяться у відкритому доступі, та безкоштовні.
---	--	--	---	--

За допомогою JavaScript на платформі Node.js відбувається зв'язок з контролером, приймаються дані, та відправляються на Хмарне сховище даних. Додаток на платформі Android за допомогою Retrofit2 отримує доступ до даних, які і використовує для побудови графіку. Зміна параметрів через додаток працює аналогічно в зворотньому напрямі.

5.3 SWOT-аналіз розроблюваного проекту

Таблиця 5.2 SWOT-аналіз розроблюваного проекту

<p>Перелік сильних сторін:</p> <ul style="list-style-type: none"> - забезпечення контролю параметрів системи з будь якої відстані підприємстві обладнання; - зручний інтерфейс, який замовник може обрати перед розробкою додатку ; - додаток не потребує значних фінансових вкладень, адже створюється за допомогою безкоштовних технологій 	<p>Можливості проекту:</p> <ul style="list-style-type: none"> - можливість запобігти виникненню аварійних ситуацій на підприємстві; - можливість змінювати параметр в системі;
---	--

<p>Перелік слабких сторін:</p> <ul style="list-style-type: none"> - для роботи додатку, потрібні дані, які не будуть надходити, якщо контролер не підключений до мережі з виходом до інтернету; - необхідність наявності на контролері веб-серверу для взаємодії з сервером та додатком; - слабка кібербезпека 	<p>Загрози проекту:</p> <ul style="list-style-type: none"> - можливість кібернетичних атак; - відсутність попиту споживачів; - вихід на цільовий ринок програм-кокурентів.
---	---

5.4 Канали збуту

Знаходження компанією власних каналів збуду розробки додатку буде свідчити про успішність проекту, тому на початку роботи компанії дуже важливо розібратись з специфікою сегменту ринка на який ввійдемо. Оскільки, сьогодні немає великої конкуренції в цій сфері, потрібно захопити весь ринок демонструючи всі переваги даного проекту. Також необхідно оптимізувати роботу додатку, вислухавши побажання замовників та мінімізувати всі недоліки, які будуть виявлені під час перших здач робіт.

Даний проект можна розширити, або мінімізувати відповідно до побажань замовника, можлива реалізація міні версії, якщо необхідно слідувати тільки за однією системою, або ж навпаки, розширену версію, з можливістю перемикається між системами, які можуть знаходитись в різних місцях. До додатку завжди можна додати нову систему для спостереження, або ж видалити неактуальну. Основним ринком збуту повинні стати підприємства з великою кількістю систем, яким буде зручно мати можливість відстежувати всі одночасно використовуючи телефон.

5.5 Визначення витрат та ресурсів необхідних для проекту

Щоб вийти на ринок зі своєю продукцією, необхідно зробити аналіз приблизних витрат, які потребує проект. Адже будь який проект має фінансову частину, яка досить часто найчастіше стає головною.

Зазвичай витрати поділяють на декілька типів:

- Інвестиційні (основний капітал)

№	Рівень цін на схожі товари	Рівень цін на прямі аналоги	Рівень доходів споживача	Межа встановлення ціни на товар(верхня/нижня)
1	Відсутній	Відсутній	Високий	50 000 -100 000

- Поточні(оренда місця, оплата праці)

Таблиця 5.3 Визначення ціни

5.6. Визначення початкових інвестиційних витрат

Для того, щоб стартап проект став успішним необхідно провести обрахунки інвестиційних витрат, адже потенційний інвестор хотітиме реальний, структурований план коштів, які потребує проект, з детальним, логічним поясненням всіх кроків на всіх етапах.

Для створення першого додатку необхідно отримати доступ до контролера з веб-сервісом, щоб домогтися реалізації алгоритму передачі даних до сервера, або до хмариного сховища даних. За допомогою Android SDK дані будуть надходити з серверу, а вся інформація буде доступна вже в самому додатку, де можна буде споглядати за результатами роботи. Отже

фактично, для першого тестового додатку необхідний доступ до всіх ланок алгоритму роботи, що становлять невеликі витрати. Для розробки повноцінного додатку з врахуванням всіх факторів системи та купи даних які надходитимуть перетворює всю роботу в досить трудомісткий процес.

5.7. Визначення виробничих витрат

Для початку роботи для розробки додатку, необхідно знайти приміщення, де програмісти зможуть працювати та тестувати додаток. Відповідно до виробничих витрат відноситься оплата за приміщення, а також комунальні витрати за нього. Чимала частина витрат становитиме заробітня плата робітникам. Важливою частиною за яку необхідно заплатити буде робота серверу, який необхідно брати в оренду.

ВИСНОВОК

Під час виконання роботи було створено систему автоматизації нагрівального колодязя, де було розглянуто два основних контури регулювання – керування температурою шляхом витрати палива в топці нагрівального колодязя та керування тиском в топці.

В ході роботи був проведений опис технологічного процесу, дослідження об'єкта автоматизації, були висунуті вимоги до метрологічного, технічного та програмного забезпечення системи управління. Також розглядалися можливі схеми регулювання й обирались найбільш кращі серед них.

Для даної системи обрано програмований логічний контролер Siemens Simatic S7-300, з відповідними модулями аналогового та дискретного вводу/виводу.

Супервізорний рівень ПТКЗА даного об'єкту автоматизації включає в себе одну робочу станцію РС.

Розробка ПЗ супервізорного рівня проводилася в середовищі WINCC від компанії Siemens. Була розроблена графічна частина проекту системи управління. Вона надає можливість отримувати інформацію про хід ТП та здійснювати оперативне управління.

Був розроблений додаток на платформі Android, функціонал якого дозволяє відслідковувати параметри системи в реальному часі, та змінювати параметри системи за допомогою телефону.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Батюк С.Г. Збірник функціональних і структурних схем типових промислових САР, Київ НТУУ „КПІ” – 2001 рік. –50 с.
2. Ключев А.С., Глазов Б.В., Дубровский А.Х. Проектирование систем автоматизации технологических процессов. М.: Энергия, 1980 г.
3. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы – 3-е изд.- М.: Энергия, 1978 – 703с.
4. Справочник по теплоснабжения и вентиляции. Книга первая. Отопление и теплоснабжение. Р.В. Щёкин и др. 4-е изд., преоб. и доп. – Киев. Будівельник, 1976 – 416с.
5. Бескерский В.А. Теория систем автоматического управления. Учебник.- СПбю: Профессия, 2003. – 752с.
6. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів і систем керування : навчальний посібник / В. М. Дубовой. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 308 с.
7. Розроблення стартап-проектів [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.
8. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986.